

03096



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Nacional Autónoma de México



“PERIODOS CARACTERÍSTICOS EN LAS OSCILACIONES
DE LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA EN UN LAGO
OLIGOTRÓFICO TROPICAL”

T E S I S

que para obtener el grado académico de
MAESTRA EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
(LIMNOLOGÍA)
presenta

BIOL. MARÍA FERNANDA ADAME VIVANCO

Director de tesis: Dr. Javier Alcocer Durand

Comité Tutorial: Dr. Javier Carmona Jiménez
Dra. Elizabeth Ortega Mayagoitia

m 346257

México D.F., 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Maria Fernanda
Adame Vivanco
FECHA: 16/ Junio /2005
FIRMA: [Firma]

"Contemplamos al universo maravillosamente dispuesto y obedeciendo a ciertas leyes, pero solamente de manera borrosa entendemos esas leyes. Nuestras mentes limitadas perciben una fuerza misteriosa que mueve a las constelaciones"

Einstein, A.

ÍNDICE

I RESUMEN	1
II ANTECEDENTES	2
III INTRODUCCIÓN	4
IV HIPÓTESIS OBJETIVOS Y METAS	8
V METODOLOGÍA.....	10
VI ÁREA DE ESTUDIO.....	14
VII RESULTADOS	17
1. PARÁMETROS FÍSICOS	
1.1 LACUSTRES	
1.1.1 Temperatura	17
1.1.1.1 Metalimnion y termoclina	21
1.1.2 PAR y zona eufótica	22
1.1.3 Oxígeno disuelto	23
1.1.3.1 Capa de mezcla	27
1.1.4 Estabilidad de la columna de agua	29
1.1.5 Nutrientes	33
1.2 ATMOSFÉRICOS	
1.2.1 Marco climático regional	
1.2.1.1 Temperatura del aire.....	35
1.2.1.2 Precipitación	36
1.2.1.3 Niebla	39
1.2.1.4 Evaporación.....	40
1.2.2 Meteorología local	
1.2.2.1 Energía solar	41
1.2.2.2 Precipitación	42
1.2.2.3 Evapotranspiración	43
1.2.2.4 Humedad	44
1.2.2.5 Temperatura del aire.....	44
1.2.2.6 Viento	45
2. PARÁMETROS BIOLÓGICOS	
2.1 Biomasa fitoplanctónica total	47
2.2 Biomasa fitoplanctónica fraccionada	
2.2.1 Talla > 2µm.....	55
2.2.2 Talla < 2µm.....	60
2.3 Porcentajes de contribución por talla	
2.3.1 Talla > 2µm.....	66
2.3.2 Talla < 2µm.....	73

3. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO	75
4. RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS LACÚSTRES, ATMOSFÉRICOS Y BIOLÓGICOS.....	77
VIII DISCUSIÓN.....	83
IX CONCLUSIONES.....	99
X REFERENCIAS.....	101
XI AGRADECIMIENTOS	106

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

DCM.- máximo profundo de clorofila (“deep chlorophyll maximum”).

OD.- oxígeno disuelto (% saturación).

PAR.- radiación fotosintéticamente activa (“photosynthetic active radiation”).

Z.-profundidad

Z_{EU} .- zona eufótica; definida como la capa limitada por la profundidad donde llega 1% PAR (Cole, 1983).

Z_{MIX} .- capa de mezcla; definida como la porción de la columna de agua que permanece mezclada por efecto del viento (Horne y Goldman, 1994).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lago Alchichica.....	14
Figura 2. Cuenca del lago Alchichica.....	15
Fig. 3. Topografía de la región colindante al lago Alchichica, Puebla.....	15
Figura 4. Comparación de promedios de temperatura (°C) entre años y periodos.....	18
Figura 5. Diagrama tiempo-profundidad (m) de isotermas durante 1998-2002. Se señalan con marcadores los puntos e intensidad de muestreo.....	19
Figura 6. Comparación de promedios por periodo de temperatura (°C) en el epilimnion.	20
Figura 7. Variación de la profundidad de la termoclina superior, inferior y oxiclina entre los años 1998-2002.	21
Figura 8. Límite inferior de la zona eufótica durante el periodo de 1999-2002. Las flechas indican puntos de inflexión.....	22
Figura 9. Límite de la zona eufótica con relación a la posición de la termoclina a lo largo de 1998-2002	23
Figura 10. Diagrama tiempo-profundidad de isopleas del porcentaje de saturación del oxígeno disuelto (%) durante los años 1998-2002. Se señalan con marcadores los puntos e intensidad de muestreo (+).....	25
Figura 11. Comparación de promedios por periodo y por año del porcentaje de saturación del oxígeno disuelto (%).	27
Figura 12. Grosor de la capa de mezcla durante los años 1998-2002	28
Figura 13. Comparación de promedios por periodo y por año de la capa de mezcla	29
Figura 14. Estabilidad ($\text{mg}/\text{cm}^3/\text{cm}$) de la columna de agua durante el periodo 1998-2002	30
Figura 15. Diagramas profundidad-tiempo de isopleas de estabilidad durante los años 1998-2002.....	33
Figura 16. Temperatura promedio (°C) del aire del periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	35
Figura 17. Temperatura media (°C) mensual durante 1998-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	36
Figura 18. Promedio de la temperatura media (°C) mensual durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).....	36

Figura 19. Precipitación total (mm) anual durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	37
Figura 20. Promedio mensual, máximo y mínimo de la precipitación total acumulada (mm) por mes durante el periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	37
Figura 21. Precipitación total acumulada (mm) mensualmente durante el periodo de muestreo 1998-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	38
Figura 22. Número promedio de días con tormenta por mes del periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	38
Figura 23. Número de días con tormenta en el periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	39
Figura 24. Promedios mensuales de días con niebla durante el periodo 1966-2001 registrados en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	39
Figura 25. Evaporación mensual (mm) durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	40
Figura 26. Promedio mensual de la evaporación (mm) mensual durante el periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).	41
Figura 27. Energía solar ($W/m^2/s$) promedio mensual y desviación estándar registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	42
Figura 28. Precipitación (mm) total mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	43
Figura 29. Evapotranspiración (ET) (mm) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	43
Figura 30. Humedad (%) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	44
Figura 31. Temperatura del aire ($^{\circ}C$) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	45
Figura 32. Velocidad del viento (m/s) registrada (cada hora) durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	46
Figura 33. Velocidad del viento (m/s) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.	46
Figura 34. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total en los años muestreados.	47
Figura 35. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total entre los años muestreados y los periodos del lago.	48

Figura 36. Comparación de promedio de la concentración de clorofila "a" total entre los años muestreados y los estratos del lago.....	49
Figura 37. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total entre los estratos del lago	50
Figura 38. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de concentraciones de clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$) total durante los años: A) 1998; B) 1999; C) 2000; D) 2001; E) 2002	54
Figura 39. Concentración de clorofila "a" total integrada en la columna de agua (mg/m^2) durante el periodo 1998-2002	55
Figura 40. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de concentración de clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$) correspondiente a la biomasa fitoplanctónica de la talla $> 2\mu\text{m}$ durante los años: A) 1998; B) 1999; C) 2000; D) 2001; E) 2002	59
Figura 41. Concentración de clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m^2) correspondiente al fitoplancton $> 2\mu\text{m}$ durante 1998-2002	60
Figura 42. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" $< 2\mu\text{m}$ entre los años muestreados y las capas del lago.....	61
Figura 43. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de concentración de clorofila "a" correspondiente a la talla $< 2\mu\text{m}$ ($\mu\text{g/L}$) durante los años: A) 1998; B) 1999; C) 2000; D) 2001; E) 2002	65
Figura 44. Concentración de clorofila "a" correspondiente al fitoplancton $< 2\mu\text{m}$ integrado en la columna de agua (mg/m^2) durante el periodo 1998-2002	66
Figura 45. Comparación entre los promedios de porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ entre los periodos del año	67
Figura 46. Comparación entre promedios del porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ en los periodos del año.....	68
Figura 47. Comparación entre los promedios del porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ en los estratos del lago	69
Figura 48. Porcentaje de contribución de las dos tallas de fitoplancton a la biomasa fitoplanctónica total durante 1998-2002.....	70
Figura 49. Porcentaje de contribución de las dos tallas ($>$ y $< 2\mu\text{m}$) de fitoplancton a la biomasa fitoplanctónica total durante 1998-2002 en el epi-, meta- e hipolimnion del lago Alchichica.....	71
Figura 50. Clorofila "a" integrada de la talla $>$ y $<$ a $2\mu\text{m}$	72
Figura 51. Correlación entre la aportación en porcentaje de la talla $> 2\mu\text{m}$ y la clorofila "a" total integrada	72
Figura 52. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de la clorofila "a" total integrada (mg/m^2).....	75

Figura 53. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de la clorofila "a" integrada de la talla >2µm (mg/m ²).....	76
Figura 54. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de la clorofila "a" integrada de la talla >2µm (mg/m ²).....	76
Figura 55. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de los porcentajes de contribución a la biomasa total de la clorofila "a" > 2µm (%).....	77
Figura 56. Nutrientes (µmol/L); NH ₄ , PO ₄ , NO ₃ , NO ₂ , SiO ₄ y su relación con los cambios de porcentaje de aportación a la biomasa total de la talla > 2µm (%) en el epilimnion.....	80
Figura 57. Nutrientes (µmol/L); NH ₄ , PO ₄ , NO ₃ , NO ₂ , SiO ₄ y su relación con los cambios de porcentaje de aportación a la biomasa total de la talla > 2µm (%) en el metalimnion.....	81
Figura 58. Temperatura registrada en el metalimnion durante la estratificación bien establecida (8 agosto) del 2004 (Alcocer).....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características ecológicas del fitoplancton determinadas por la talla	5
Tabla 2. Temperatura (°C) para cada año muestreado (1998-2002) y fechas donde se presentaron los valores máximos y mínimos	17
Tabla 3. Valores de temperatura (° C) por época; circulación (A.), estratificación temprana, bien establecida y tardía (B) y por estrato (epi-, meta- e hipolimnion)	20
Tabla 4. Profundidad (m) de la zona eufótica por periodo durante el periodo 1998-2002	22
Tabla 5. Valores de oxígeno disuelto expresados en porcentaje de saturación (%) para cada año muestreado (1998-2002). Se indican las fechas donde se presentaron los valores máximos en cada año	24
Tabla 6. Valores de oxígeno disuelto expresadas como porcentaje de saturación (%) por periodo; circulación (A.), estratificación temprana, bien establecida y tardía (B) y por estrato (epi-, meta- e hipolimnion)	26
Tabla 7. Heterogeneidad máxima (%) en la columna de agua durante el periodo de circulación de NH ₄ , PO ₄ NO ₃ y SiO ₄	34
Tabla 8. Temperatura del aire (°C) del periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional)	35
Tabla 9. Precipitación mensual (mm) máxima y total durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional)	37
Tabla 10. Biomasa fitoplanctónica total expresada como clorofila "a" (µg/L) promediada de 5 años (1998-2002) y promedios máximos y mínimos.....	48
Tabla 11. Biomasa fitoplanctónica total expresada como clorofila "a" (µg/L) promediada por año, por estrato (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo.....	51
Tabla 12. Clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m ²) del Lago Alchichica	55
Tabla 13. Biomasa fitoplanctónica > 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promedio de 5 años (1998-2002) y promedios máximos y mínimos.....	56
Tabla 14. Biomasa fitoplanctónica > 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promedio por año, por estrato (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo.....	56
Tabla 15. Clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m ²) correspondiente al fitoplancton >2µm (1998-2002).....	59
Tabla 16. Biomasa fitoplanctónica < 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promediada de 5 años (1998-2002) y promedios máximos y mínimos.....	61

Tabla 17. Biomasa fitoplanctónica < 2µm expresada como clorofila “a” (µg/L) promedio por año, estrato (epi-, meta- e hipolimnion) y periodo.....	62
Tabla 18. Clorofila “a” integrada en la columna de agua (mg/m ²) correspondiente al fitoplancton <2µm (1998-2002).....	65
Tabla 19. Porcentajes promedio de contribución de la talla > 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por año.....	66
Tabla 20. Porcentajes promedio (1998-2002) de contribución de la talla > 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por periodo.....	67
Tabla 21. Porcentajes promedio de contribución de la talla > 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por capa (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo.....	69
Tabla 22. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por año.....	73
Tabla 23. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por periodo.....	73
Tabla 24. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por capa (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo.....	74
Tabla 25. Porcentajes promedio de contribución de la talla > 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por año, capa (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo.....	74
Tabla 26. Parámetros físico-químicos y biológicos característicos de la zona eufótica por periodo (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía) del lago Alchichica.....	78
Tabla 27. Luz, nutrientes, suspensión y temperatura características de cada periodo (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía) para el lago Alchichica.....	78
Tabla 28. Regresión múltiple de los valores de clorofila “a” total y nutrientes; NH ₄ , PO ₄ , NO ₃ , NO ₂ , SiO ₄	82
Tabla 29. Regresión múltiple de los valores de clorofila “a” correspondiente a la talla > 2 µm (A) y < 2 µm (B) y nutrientes; NH ₄ , PO ₄ , NO ₃ , NO ₂ , SiO ₄	82

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Conversión de datos fluorométricos a μg clorofila "a"/L.....	11
Ecuación 2. Calculo de estabilidad de la columna de agua.....	11
Ecuación 3. Ajuste polinomial de integración de la clorofila "a".....	12

I RESUMEN

En el presente trabajo se buscó reconocer las oscilaciones y los periodos característicos en la biomasa fitoplanctónica del lago Alchichica a lo largo de un periodo de cinco años (1998-2002). La biomasa fitoplanctónica fue evaluada a través de la concentración de la clorofila "a" tanto total como fraccionada en dos tallas (grande ó $> 2\mu\text{m}$ y pequeña ó $< 2\mu\text{m}$). A partir de esto, se analizó la relación entre estas oscilaciones y las variables físico-químicas y meteorológicas. Para ello, se realizaron muestreos cuasi-mensuales a lo largo de la columna de agua en los cuales se midió la concentración de clorofila "a", la radiación fotosintéticamente activa (PAR), el oxígeno disuelto (OD, %) y la temperatura (T, °C) del agua. A partir de estos datos se calculó la zona eufótica y la capa de mezcla. Por otra parte, se utilizaron datos de temperatura del aire, niebla, evaporación, lluvia y tormenta (1966-2002) obtenidos de una estación meteorológica cercana a Alchichica y proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Asimismo, se registraron parámetros meteorológicos con una estación ubicada *in situ* (2003) para observar tendencias en el clima local. También se incluyeron en el análisis los datos de nutrientes mencionados en Sánchez (2005) para los años 1999-2002. Se realizaron análisis de series de tiempo y se obtuvieron los periodos característicos de la variación de la clorofila "a" total, fraccionada y los periodos de la variación del porcentaje de contribución de talla de fitoplancton. El análisis reveló la presencia de los siguientes periodos: bianual, anual, semestral y de cuatro meses. El periodo bianual sugiere la alternancia entre dos tipos de años, presentes en el periodo 1999-2002. Los años pares (2000, 2002), "Tipo 1", muestran un periodo de circulación con valores altos de biomasa fitoplanctónica, concentraciones altas de OD y nutrientes distribuidos de forma más o menos homogénea a lo largo de la columna de agua. Asimismo, se detectan picos hipolimnéticos de clorofila "a" durante la estratificación temprana, el desarrollo de anoxia temprana (marzo-abril) en el hipolimnion, la liberación de NH_4 durante la estratificación tardía y un déficit de OD importante en el hipolimnion. Alternadamente, están los años nones (1999, 2001), "Tipo 2", que presentan concentraciones bajas de clorofila "a" y OD durante la circulación, distribuidos de forma heterogénea en la columna de agua; de forma similar los nutrientes presentan una distribución desigual. Durante la estratificación temprana se presentan valores mínimos de clorofila "a" en toda la columna de agua así como un inicio tardío de anoxia hipolimnética (mayo-junio) y un déficit de oxígeno menor que el año anterior el cual es compensado en el siguiente periodo de circulación dando lugar nuevamente al año "Tipo 1". Esta alternancia de años pudiera no ser representativa de la hidrodinámica del lago Alchichica al considerar un análisis a más largo plazo; la oscilación probablemente sea resultado de un evento desencadenador como lo fue el invierno especialmente frío del año 2000, año correspondiente al fenómeno de la Niña y un control interno como es la disponibilidad del silicato. Por otro lado, el periodo anual corresponde a la hidrodinámica característica del lago con sus periodos de circulación y estratificación. Los periodos semestrales y de 4 meses corresponden, a las oscilaciones entre el típico florecimiento de cianobacterias presente durante la estratificación temprana, el máximo profundo de clorofila (DCM) característico durante la estratificación bien establecida así como los picos de biomasa esporádicos que se desarrollan durante la estratificación tardía. La talla $> 2\mu\text{m}$, es la dominante y consecuentemente, presenta los mismos periodos característicos. La talla $< 2\mu\text{m}$ presentó el periodo anual, seguido de un periodo de 19 meses, lo cual demuestra su comportamiento independiente del fitoplancton de talla mayor. Los porcentajes de aporte de cada talla a la biomasa total mostraron una variación concordante con los dos tipos de años mencionados. En los años "Tipo 1" la talla $> 2\mu\text{m}$ domina todo el año con una tendencia a disminuir su porcentaje conforme avanza el año. Por otra parte, en el año "Tipo 2" la talla $< 2\mu\text{m}$ domina únicamente durante la estratificación temprana, el resto del año domina la talla grande, la cual presenta una tendencia a aumentar hacia finales del mismo. Los aumentos del porcentaje de contribución de la talla $> 2\mu\text{m}$ están relacionados con el aumento la concentración de la clorofila "a" total y ambas están relacionadas con aumentos en la "suspensión" de la columna de agua, esto es, la facilidad de mantenerse en la zona fótica ya sea por turbulencia o por la presencia de una picnoclina, y con la cantidad de nutrientes disponibles, de los cuales, el NH_4 parece ser el más importante.

II ANTECEDENTES

El conocimiento de la limnología tropical se ha generado principalmente a partir de la segunda mitad del siglo veinte. Es por lo anterior que este campo de la ciencia adolece de grandes rezagos con relación a la limnología templada la cual se remonta tiempo atrás hasta hace más de un siglo (Talling 1998).

Los estudios sobre lagos tropicales son –comparativamente- escasos, y aún más son aquellos que involucran muestreos y análisis realizados durante largos periodos de tiempo (i.e. series de tiempo). Algunas excepciones son los estudios desarrollados Chapala en México (Tereshchenko *et al.* 2002), en los lagos Victoria (Talling y Lemoalle 1998) y Tangañica en África (Sarvala *et al.* 1999), Lanao en Filipinas (Lewis 1972), Valencia en Venezuela (Lewis 1986), así como el lago subtropical Kinneret en Israel (Hambright *et al.* 1994). En éstos ha sido posible discernir patrones de estacionalidad y generar herramientas de predicción en relación a diferentes factores como son la hidrodinámica (Tereshchenko *et al.* 2002), estratificación (Hambright *et al.* 1994), florecimientos algales (Stronge *et al.* 1998), así como de producción primaria y biomasa fitoplanctónica (Berman *et al.* 1995).

En México, el lago Alchichica ha sido estudiado en forma regular por más de cinco años. De éste se conoce información sobre nutrientes (Sánchez 2000 y Sánchez 2005), bacterioplancton (Lugo *et al.* 2001), fitoplancton (Oliva *et al.* 2001) y zooplancton (Lugo *et al.* 1993, 1999), así como de su hidrodinámica (Alcocer *et al.* 2001; Filonov y Alcocer 2002).

Más específicamente, se han estudiado cambios en la biomasa fitoplanctónica expresada como clorofila “a” total y fraccionada por tallas (< 2µm y > 2µm) (Sánchez 2000; Adame 2004). En estos estudios se encontró que existe una dominancia de la talla de fitoplancton mayor a 2µm, dominancia que se mantiene durante todo el año a excepción de algunos periodos de estratificación temprana en los años 1998 y 1999 (Sánchez 2000) y el año 2001 (Adame 2004). Esto resulta inusual y contradictorio con lo reportado en la literatura existente sobre el tema que establece que en lagos oligotróficos y bien estratificados domina el picoplancton (Stockner 1988; Frenette *et al.* 1993,1994,1996b; Zhao *et al.* 2001) que, cabe mencionar, trata principalmente de estudios realizados en altas latitudes. La dominancia de la talla de fitoplancton mayor a 2 µm tiene importantes implicaciones ya que esta talla tiende a sedimentarse (Legendre 1999) contribuyendo así, no sólo a desoxigenar el hipolimnion del lago y a eliminar los nutrientes de la capa de mezcla, sino al secuestro del CO₂ atmosférico (Tremblay *et al.* 1997 y Legendre 1999), lo cual ha sido relacionado con el calentamiento global (Chisholm *et al.* 2001).

Debido a la carencia de estudios sobre fracciones de tallas de fitoplancton en lagos de bajas latitudes, la explicación a esta anomalía en lagos tropicales que rompe un paradigma de la limnología templada tendría que buscarse en publicaciones que analicen las diferencias entre los mecanismos ecológicos que se desarrollan en los lagos tropicales y templados (p.e. Payne 1986, Lewis 1996,

Melack 1996 y Talling y Lemoalle 1998), así como en estudios realizados sobre fitoplancton de lagos tropicales (p.e. Lewis 1978,1996; Huszar *et al.* 1998, Hawkins y Griffiths 1993).

Una de las diferencias principales entre la limnología tropical y la templada es el factor climático. Por ejemplo, el viento. Su efecto sobre las variaciones en la hidrodinámica del lago (Hambricht *et al.* 1994; Tereshchenko *et al.* 2002; Mistry *et al.* 2003), así como su influencia sobre la producción primaria y en específico sobre la composición por tallas del fitoplancton (Frenette *et al.* 1996b) ha sido estudiado en lagos templados.

Con base en estas investigaciones, parece factible que un estudio a largo plazo de las variaciones de la biomasa fitoplanctónica, así como de las tallas de fitoplancton en el Lago Alchichica pueda establecer si existen periodos de variación recurrentes y establecer una relación del paradigma sobre la predominancia de tallas que se manifestó en estudios previos con la hidrodinámica del lago tropical y con factores climáticos, y si éstas variaciones de talla se mantienen a lo largo de todo el periodo de muestreo de una forma recurrente.

III INTRODUCCIÓN

Dentro de los estudios ecológicos que se realizan sobre lagos, la evaluación de la biomasa de los productores primarios es de especial importancia ya que representa la base de la cadena trófica y es la responsable directa de la productividad total del lago. Por lo general, los estudios de los productores primarios en cuerpos de agua se realizan con base en mediciones de clorofila “a” –pigmento fotosintético presente en todas las algas y cianobacterias (Wetzel 2001)- y en la composición taxonómica de las especies fitoplanctónicas.

La variación de la biomasa fitoplanctónica está determinada principalmente en función de la luz, la temperatura, la suspensión de las células en la columna de agua y la disponibilidad de nutrientes (Reynolds 1984,1988), lo cual genera dentro del cuerpo acuático un gradiente vertical y otro temporal. En cuanto al gradiente vertical, por lo general se reconocen: una zona de fotoinhibición, una profundidad con un pico de producción y un declive progresivo de éste máximo de producción hasta el fondo debido a la limitación de luz (Payne 1986; Barnes y Mann 1991). En ambientes oligotróficos y tropicales, este pico de producción puede coincidir con el “máximo profundo de clorofila” (DCM, por sus siglas en inglés) que se encuentra acoplado a la nutriclina (Cullen 1982). En relación a la variación temporal, ésta está representada principalmente por cambios diarios y estacionales a lo largo de un ciclo anual (Talling y Lemoalle 1998, Barnes y Mann 1991).

Las variaciones de estos factores conllevan a variaciones directas en la producción primaria de un lago, en la cadena trófica de estos ecosistemas (Melack 1976) y en la distribución del tamaño o talla del fitoplancton.

La distribución de las diferentes tallas de fitoplancton resulta ser un buen indicador de las relaciones ecológicas y de la dinámica de las poblaciones fitoplanctónicas (Gaedke 1993). En algunos casos, es aún mejor que el estudio taxonómico de las especies mismas (Bruno *et al.* 1983; Guerrero y Castro 1997). Esto se debe a la importancia ecológica de la relación área-volumen (A:V) de la célula, lo que influye en la dinámica del fitoplancton, en la tasa de procesos metabólicos (Barnes y Mann 1991) de crecimiento y reproducción, en la obtención de nutrientes (Lafond *et al.* 1990; Frenette *et al.* 1994; Agawin 1999), en el flujo de energía (Bruno *et al.* 1983), la depredación y en la eficiencia del ecosistema (Guerrero y Castro 1997) (Tabla 1). El procedimiento de dividir al fitoplancton en tallas con relevancia ecológica es lo que se conoce como fraccionamiento celular.

Tabla 1. Características ecológicas del fitoplancton determinadas por la talla. (+) se refiere a una respuesta positiva y (-) a una respuesta negativa, i.e. aumento o disminución de su biomasa y/o producción.

Característica	<2µm	>2µm	Nota	Referencia
Área de exposición con relación al volumen	+	-		Lafond <i>et al.</i> 1990; Gaedke 1993.
Absorción de nutrientes	+	-		Suttle y Harrison 1998; Lafond <i>et al.</i> 1990; Agawin <i>et al.</i> 1999.
Cantidad de nutrientes necesarios	-	+		Frenette <i>et al.</i> 1994; Agawin <i>et al.</i> 1999.
Tasa de producción y biomasa	+	-	Sobre todo en lagos oligotróficos	Watson y Kalff 1981; Craig 1984; Stockner 1987, todos citados por Lafond <i>et al.</i> 1990.
Favorecidos en aguas turbulentas	-	+		Wetzel 2001; Waite y Thompson 1992; Malone y Chervin 1979; Tremblay <i>et al.</i> 1997.
Favorecido en aguas estables	+	-		Wetzel 2001; Waite y Thompson 1992; Malone y Chervin 1979, Tremblay <i>et al.</i> 1997.
Tasa de sedimentación	-	+	Puede variar dependiendo de la cantidad de luz.	Wetzel 2001; Margalef, 1983; Waite y Thompson 1992.
Exportación al fondo	-	+		Tamigneaux <i>et al.</i> 1999.
Favorecido en ambientes con "estrés"	+	-	Se le puede considerar a "estrés": elevadas temperaturas, acidificación y alta salinidad entre otros	Guerrero y Castro 1997; Margalef 1983.
Tasas de reproducción	+	-		Bruno <i>et al.</i> 1983; Zafar 1986.
Tasa de respiración	+	-		Lalli y Parsons 1993.
Tasa de liberación de N	+	-		Lalli y Parsons 1993.
Cantidad de luz que satura su fotosíntesis	-	+	i.e. saturar sus fotosistemas	Frenette <i>et al.</i> 1996a.
Tolerancia a la variación de la radiación	+	-		Frenette <i>et al.</i> 1996a.

Otra característica ecológica del fitoplancton que está determinada por la talla es la relación depredador-presa (Kim y Chang 1992; Ross y Munawar 1981).

Por otra parte, se ha sugerido (Frenette *et al.* 1994) que la biomasa del fitoplancton $< 2\mu\text{m}$ tiende a permanecer relativamente constante a diferencia del fitoplancton más grande el cual tiende a perderse más fácilmente por sedimentación y herbivoría dando como resultado una producción más fluctuante.

Dependiendo de la dominancia de una u otra talla (con relación a la biomasa total), el flujo de carbono biogénico (C_{BIO}) en los ecosistemas acuáticos (i.e., la transferencia de energía en el ecosistema) puede ser previsto (Legendre 1999). Si la talla dominante es la pequeña, se presume que la ruta principal será el reciclamiento de nutrientes en las capas superficiales del lago y las cadenas alimenticias microbianas ("microbial loop"), por otra parte, si la talla dominante del fitoplancton es la grande, el hundimiento del plancton no consumido hacia el fondo del lago y la depredación, serán las rutas del C_{BIO} principales.

Como se ha mostrado, la dominancia de una u otra talla de fitoplancton está en gran parte en función de las características ecológicas del ambiente. Es decir, se puede esperar que la variación de éstas resulte en variaciones de la dominancia de una u otra talla. Así, las condiciones presentes en cada tipo de lago y en su hidrodinámica característica (i.e., épocas de estratificación y circulación) no sólo afectarán a la biomasa producida y a las especies, sino también influirán en la talla de fitoplancton dominante.

Los estudios en lagos tropicales (Lewis 1973, 1996; Payne 1986; Melack 1996; Talling y Lemoalle 1998) han mostrado que en bajas latitudes existen importantes diferencias en la hidrodinámica de los lagos en comparación con aquellos de altas latitudes, por lo que se pueden esperar variaciones en la distribución de las tallas del fitoplancton.

Las características que diferencian a los lagos tropicales de aquellos de zonas templadas son atribuidas principalmente a los factores climáticos. En relación a la radiación solar, la diferencia principal radica en la radiación mínima mensual -que es menor en zonas alejadas del Ecuador- y en el rango de la fluctuación anual -que es menor en zonas aledañas al Ecuador- (Lewis 1996). La diferencia en la radiación solar afecta directamente la temperatura del agua, siendo diferencia importante entre los lagos tropicales y templados la temperatura mínima -especialmente la del fondo- que es menor a medida que uno se aleja del Ecuador (Lewis 1996). La elevada temperatura en las aguas de los lagos tropicales tiene influencia en su hidrodinámica, ya que éstos se estratifican aún con cambios de temperatura reducidos debido a que a altas temperaturas se generan diferencias de densidad mayores por cada grado centígrado de diferencia.

Debido a la posición geográfica y la inclinación de la Tierra, existe una estacionalidad más marcada en las zonas templadas que en las tropicales. Los lagos tropicales definen su estacionalidad a partir de la época de lluvias alternada

con la de secas, más que a partir de diferencias de luz y temperatura. A pesar de que las diferencias climáticas son poco marcadas en las zonas tropicales, estudios como los realizados por Lewis (1986) en el Lago Valencia, Venezuela, han demostrado la existencia de un patrón, es decir, que existe una estacionalidad predecible respecto a la mezcla y estratificación del lago año tras año.

Finalmente, la fuerza de Coriolis es cero a nivel ecuatorial y máxima en los polos, por lo que el viento no disminuye su velocidad a bajas latitudes lo que resulta en un aumento en el grosor de la capa de mezcla y una disminución en la estabilidad de la columna de agua (Lewis 1996).

En general, se puede afirmar que la estratificación y mezcla en los lagos tropicales se da con mayor facilidad en respuesta a cambios en el viento y a la inversión en el flujo calórico, es decir, al enfriamiento del lago al proporcionar calor a la atmósfera (Lewis 1973). Es por esto, que la estabilidad de la columna de agua –medida como la resistencia de la estratificación a ser mezclada (Wetzel, 2001) y relacionada con las diferencias de densidad- es de gran importancia ya que puede originar eventos de “atelmixis” (Lewis 1973) o mezclas parciales de la columna de agua, lo cual tiene efectos sobre el reciclamiento parcial de nutrientes (i.e., nutrientes “atrapados” en el tope de la termoclina al epilimnion o capa mezclada) y en la sucesión de comunidades planctónicas (Lewis 1996).

Estas diferencias entre los lagos templados y tropicales se ven reflejadas -asimismo- en su biología. Se considera que por lo general, los lagos tropicales suelen ser menos diversos y más productivos que los templados (Lewis 1978); este hecho es debido –principalmente- a que las temperaturas elevadas que prevalecen durante casi todo el año favorecen un reciclamiento de nutrientes más efectivo (Payne 1986; Lewis 1996). Con respecto a los organismos que constituyen a la biomasa fotosintética de los lagos tropicales, se ha reconocido una diversidad menor en las zonas tropicales (Lewis 1996).

Con base en estas diferencias en la hidrodinámica de un lago tropical, es de esperarse que efectos como el viento, la lluvia, y los pulsos de nutrientes tengan efectos diferentes sobre la estructura ecológica y con esto respuestas específicas de organismos como el fitoplancton, más específicamente, en la distribución de tallas o tamaños de los productores primarios, en una escala espacial, estacional e inclusive en periodos más largos de tiempo.

IV HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y METAS

Con el fin de reconocer las oscilaciones y periodos de variación más importantes a lo largo de cinco ciclos anuales de la biomasa fitoplanctónica (expresada como clorofila "a" total y fraccionada) mediante análisis de series de tiempo, y su posible relación con la variación de los factores ambientales en el lago Alchichica, se consideró:

a) Que las variaciones cuantitativas espacio-temporales de la biomasa de los productores primarios del lago Alchichica estarán íntimamente ligadas a las condiciones ambientales derivadas -en gran medida- de su hidrodinámica (periodos de circulación y estratificación) regular, descrita previamente por Alcocer *et al.* (2001).

b) Que estudios previos (Sánchez 2000, Adame 2004) en el lago Alchichica han mostrado una dominancia de la talla grande ($> 2\mu\text{m}$) de fitoplancton a lo largo del ciclo anual -a excepción de eventos breves de dominancia de la talla pequeña ($< 2\mu\text{m}$) durante la estratificación temprana-, situación contraria a lo descrito en la literatura (Stockner 1988; Frenette *et al.* 1993,1994,1996b; Zhao *et al.* 2001) la cual evidencia que en lagos oligotróficos y estratificadas de zonas templadas, son dominadas por picofitoplancton la mayor parte del año.

c) Que existen características ambientales importantes (Lewis 1996) que diferencian los lagos tropicales de los templados, las cuales pudieran explicar la frecuencia de los periodos de variación de la biomasa fitoplanctónica en el lago Alchichica, así como la predominancia de la talla grande de biomasa fitoplanctónica (e.g., la baja estabilidad de la termoclina de los lagos tropicales durante la época de estratificación, lo cual puede estar afectada por condiciones climáticas que puede generar episodios de mezcla parcial -"atelmixis"- y con ello el reinicio de la sucesión fitoplanctónica (Lewis 1973)).

La primera interrogante planteada fue el reconocer la existencia de un patrón de variación temporal de la clorofila "a" total y fraccionada repetitivo a lo largo de cinco ciclos anuales. De ésta se deriva las siguientes hipótesis:

H1- El periodo más importante de variación de la clorofila "a" total es el anual el cual está determinado por la hidrodinámica (monomixis cálida) regular del lago.

H2- Los periodos de variación de la fracción de clorofila "a" $> 2\mu\text{m}$ son similares a aquellos de la clorofila "a" total debido a que esta talla es la dominante la mayor parte del año.

H3- Los periodos de variación de la fracción de clorofila "a" $< 2\mu\text{m}$ no son variaciones periódicas regulares, manteniéndose comparativamente constante.

La segunda interrogante se abocó a reconocer los factores responsables de la variación de la clorofila "a" total y fraccionada. Para contestar esta pregunta, se plantearon las siguientes hipótesis:

H4- La clorofila total, así como la de la fracción de talla grande, se verán favorecida por ambientes con un alto grado de “suspensión”, ya sea por mezcla turbulenta, o una zona de picnoclina y/o variaciones frecuentes de la Z_{MIX} (“atelmixis”). Las condiciones opuestas –bajo grado de “suspensión”- favorecerán la dominancia de la talla pequeña.

H5- La talla grande se verá favorecida por ambientes con relativamente alta disponibilidad de nutrientes; lo contrario favorecerá a la dominancia de la talla pequeña.

H6- Las variables ambientales que favorezcan condiciones de “suspensión” y una relativa alta concentración de nutrientes serán las que expliquen en mayor grado, las variaciones en la concentración de biomasa fitoplanctónica.

La tercera interrogante se abocó a reconocer los cambios de dominancia de las dos fracciones de talla de fitoplancton a lo largo de cinco ciclos anuales. Para contestar a esta interrogante, se planteó la siguiente hipótesis;

H7- Durante los cinco ciclos anuales, la dominancia de la talla pequeña se restringirá a breves episodios durante la estratificación temprana, el resto del año dominará la talla grande.

Con base en lo anterior, los objetivos de este estudio fueron:

- a) Detectar los periodos de variación temporal de la clorofila “a” total y fraccionada a lo largo de cinco ciclos anuales.
- b) Relacionar los periodos más importantes de variación de la clorofila “a” con las principales variables ambientales.
- c) Establecer la relación de dominancia de las dos fracciones de talla a la biomasa total a lo largo de cinco ciclos anuales.

Para cumplir estos objetivos se propusieron las siguientes metas:

Meta 1. Detectar los periodos de variación temporal de la clorofila “a” total y fraccionada (talla $>$ y $<$ a $2\mu m$) a lo largo de cinco ciclos anuales

Meta 2. Relacionar los periodos de variación de la clorofila “a” total y fraccionada con las variaciones de los parámetros físicos: Z_{MIX} , Z_{EU} , temperatura y estabilidad de la columna de agua.

Meta 4. Relacionar los periodos de variación de la clorofila “a” total y fraccionada con las variaciones de los parámetros meteorológicos: temperatura del aire, precipitación, viento, niebla, evaporación y radiación solar.

Meta 5. Relacionar los periodos de variación de la clorofila “a” total y fraccionada con las variaciones de los parámetros químicos: nutrientes.

Meta 6. Identificar las variables ambientales que mejor expliquen la dominancia de una fracción de talla de biomasa fitoplanctónica sobre la otra.

V METODOLOGÍA

Trabajo de Campo: Para evaluar la concentración de la clorofila “a” a largo de la columna de agua del lago Alchichica así como su variación temporal, se realizaron muestreos mensuales a lo largo de un periodo de cinco años consecutivos (1998-2002), aunque durante el año 1998 no se obtuvieron muestras de agua durante los meses de enero y febrero. Se registraron perfiles de temperatura, OD y PAR con la finalidad de estimar la Z_{EU} , y la Z_{MIX} , así como perfiles de fluorescencia en vivo para estimar las variaciones en la distribución de la clorofila “a” en la columna de agua. Las dos primeras variables se midieron con ayuda de un sistema de monitoreo de calidad de agua Hydrolab DS4/SVR4 (discretización = 1m); para evaluar las dos últimas variables se empleó un perfilador de fluorescencia natural Biospherical PNF-300 (discretización = 1 seg). A partir de estos perfiles se escogieron 5 (1998,1999) ó 10 (2000, 2001,2002) profundidades de muestreo que mejor representaran la distribución de la clorofila “a”. En estas profundidades, se tomaron las muestras de agua con una botella muestreadora tipo Niskin con una capacidad de 1.5 litros. Se obtuvieron 500 mL de muestra de cada profundidad para el posterior análisis de la clorofila “a”. Las muestras se etiquetaron y se transportaron al laboratorio en frascos oscuros y en refrigeración.

Trabajo de Laboratorio: Para la evaluación de la concentración de clorofila “a” fraccionada, fueron filtrados 50 ml de cada muestra a través de un filtro de fibra de vidrio GF/F (apertura de poro nominal 0.7 μ m). Otro volumen equivalente fue filtrado primero a través de un filtro TTP (apertura de poro 2 μ m) y posteriormente, a través de uno GF/F. La clorofila retenida en el primero correspondió al fitoplancton de talla “grande” (> 2 μ m) mientras que la que pasó a través del primero pero fue retenida en el segundo, correspondió al fitoplancton de talla “pequeña” –picofitoplancton- (< 2 μ m). Esto se realizó con la finalidad de evaluar el porcentaje de contribución de las dos fracciones de tallas del fitoplancton a la biomasa fitoplanctónica total. Posteriormente, se extrajo la clorofila de estos filtros con acetona al 90% durante un periodo mayor a 12 y menor de 24 horas en oscuridad y refrigeración (Margalef 1983; Frenette *et al.* 1994). La clorofila extraída se leyó en un fluorómetro digital Turner Designs 10-AU. El fluorómetro se calibró para proporcionar una resolución alta en sacrificio de un menor rango de detección (se calibró en el rango más bajo de concentración, útil para aguas oligotróficas como es el caso de Alchichica). La calibración se realizó con un estándar primario de clorofila “a” líquido de Turner Designs con concentración de 15.5 μ g/L de clorofila “a” libre de clorofila “b”, en una solución al 90% de acetona (10% agua destilada). Esta calibración es anual. Para cada muestreo se recalibró con un estándar secundario de clorofila “a” sólido, el cual fue previamente calibrado contra el estándar primario a 6 μ g/L. En algunas ocasiones las muestras tuvieron que ser diluidas con acetona para poder ser leídas dentro del rango de detección. Posteriormente, las lecturas se convirtieron a μ g de clorofila “a”/L utilizando el algoritmo de la Ecuación 1, indicada en el método 445.0 (United States Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Cincinnati, OH). Cabe hacer notar que este método fue específicamente diseñado para utilizar el fluorómetro Turner Designs 10-AU.

$C_{s,u} = \frac{(C_{e,u}) (\text{volumen extraído (L)}) (FD)}{\text{volumen muestreado (L)}}$	Ecuación 1
--	------------

Donde:

C_{s,u}= concentración de clorofila “a” (µg/L) en toda la muestra de agua

C_{e,u}= concentración de clorofila “a” (µg/L) no corregida en la solución extraída y analizada

Volumen extraído = volumen (L) de la extracción antes de ser diluida

FD = factor de dilución

Volumen muestreado = volumen (L) de toda la muestra de agua.

Trabajo de Escritorio: las concentraciones de clorofila “a” totales y fraccionadas se arreglaron de forma tabular –con relación a la profundidad (renglones) y tiempo (columnas) al igual que los de temperatura, oxígeno disuelto y PAR-. Para cada variable se elaboró una gráfica tiempo-profundidad- variable utilizando el programa Surfer versión 7.0, extrapolación “kriging”. Con base en los diagramas tiempo-profundidad de isotermas y OD se delimitaron las zonas del epi, meta e hipolimnion en la columna de agua, según el criterio en el cual se considera que la región donde se encuentra la termoclina (que generalmente coincide con la oxiclina) corresponde al metalimnion, la capa superior a éste el epilimnion y la inferior el hipolimnion. De los diagramas tiempo-profundidad de isopleas de temperatura, oxígeno y de isopleas PAR se estimó Z_{EU}, junto con Z_{MIX}. Esta última fue ubicada como aquella capa delimitada entre la superficie del lago y el tope de la termoclina y a falta de ella (circulación), la oxiclina. Se calculó la estabilidad de la columna de agua metro a metro con base a las diferencias de densidades (Malone y Chervin, 1979) obtenidas a partir de la temperatura (Emilsson com. pers.). Se realizaron medias ponderadas a cada metro de profundidad, y se obtuvo un valor promedio para toda la columna de agua. Par ello, se utilizó la Ecuación 2.

Estabilidad = $\frac{\Delta \delta}{\Delta \text{profundidad (m)}}$	Ecuación 2
---	------------

Donde:

Δ δ (sigma)-t: cambio de sigma (densidad-1*1000) por metro de profundidad, i.e.
 $\delta t_1 - \delta t_2$

Δ profundidad (m): profundidad 1 - profundidad 2.

Con la finalidad de facilitar la apreciación de este valor, el resultado se multiplico por 100, ya que los valores de δ que obtuvimos en las temperaturas registradas fueron menores a uno, por lo que al restar y dividir, estos valores se volvían muy pequeños. Cabe señalar que aunque ésta no es la forma ideal de calcular la estabilidad de la columna de agua, sí da una idea general de las condiciones de suspensión. Posteriormente, se graficó la biomasa de las distintas tallas del fitoplancton por separado (diagramas tiempo–profundidad isopleas de concentración de clorofila “a”) y se calculó la aportación (en porcentaje) de cada una de ellas a la biomasa total en todo el lago y en cada estrato del lago

(epilimnion, metalimnion e hipolimnion) utilizando medias ponderadas. Se considero que una talla era dominante si su porcentaje era $\geq 70\%$ y codominante si era $\geq 50\%$. A continuación, y con la finalidad de obtener valores de toda la columna de agua de la clorofila "a" total y fraccionada, se integraron los valores muestreados utilizando un ajuste polinomial de integración de la clorofila "a" ("Polynomial fit for integration of the chlorophyll", Legendre y Legendre, 1998) siguiendo la Ecuación 3.

$\text{Clorofila "a" int.} = \sum (/Z_2-Z_1/) ((\text{Clo.1} - \text{Clo. 2}) / 2)$	Ecuación 3
---	------------

Donde:

Clorofila int. = clorofila "a" integrada (mg/m²)

Σ = sumatoria

Z = profundidad

Clo. 1 = clorofila "a" (µg/L) en profundidad 1

Clo. 2 = clorofila "a" (µg/L) en profundidad 2

Debido a que no existe información meteorológica detallada para todo el periodo de tiempo analizado, se realizó una aproximación utilizando los datos meteorológicos de un ciclo anual (2003) y de forma tentativa se trató de relacionar con los periodos de la clorofila "a" y los cambios de talla en los cinco años muestreados. La información meteorológica (energía solar, precipitación, evapotranspiración, temperatura del aire y viento) fue obtenida a través de una estación modelo GroWeather de la marca Davis (discretización temporal = 1 hora). Datos de una estación meteorológica cercana a Alchichica proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (1966-2002) de temperatura del aire, niebla, evaporación, lluvia y tormenta (lluvia >10mm) se utilizaron para observar tendencias en el clima de esa región así como para relacionar estos datos con los de la información obtenida *in situ* y considerar si eran lo suficientemente parecidos como para poder ser utilizados en la discusión. Se utilizaron datos de nutrientes generados por Sánchez (2005) para los años 1999-2002 para buscar relaciones entre sus variaciones y los de la clorofila "a" total y fraccionada. Para conocer la uniformidad de la distribución en la vertical de la clorofila "a", OD y nutrientes, se midió el porcentaje de la desviación estándar con relación a la media como índice de homogeneidad. Se realizaron comparaciones estadísticas de todos los años de forma temporal y espacial utilizando ANDEVAs (Statistica 6.0) de una vía cuando se compararon dos variables, y factoriales cuando se compararon más de dos. Complementariamente se realizaron pruebas de Tukey para distinguir las diferencias (caracterizadas anteriormente con ANDEVA) particulares entre las variables utilizadas. De la misma forma se relacionaron las variables físicas, químicas y biológicas a través de correlaciones múltiples (Statistica 6.0). Finalmente, se realizaron análisis de series de tiempo. Para ello los datos de clorofila "a" total y fraccionada (talla > y < a 2µm) integrada en la columna de agua fueron homogeneizados a 30 días (1 mes) utilizando interpolaciones. Los obtenidos se normalizaron y transformaron utilizando la transformada rápida de Fourier (ver logaritmo en Anexo II). Se eliminó la tendencia lineal y se obtuvieron los principales periodos de cambio de estas variables a través de periodogramas de frecuencia (x) y amplitud espectral (y) con un intervalo de confianza de 0.95. Los periodos se obtuvieron calculando el

inverso de las frecuencias más importantes. Se consideraron como periodos significativos de la muestra aquellos de π /meses, i.e. 3.14 hasta 28 meses. Con el fin de verificar la significancia de los periodos obtenidos, se volvieron a realizar los periodogramas utilizando un suavizador de una ventana espectral de grado uno ($f=1$).

VI ÁREA DE ESTUDIO

Lago Alchichica

El lago Alchichica se localiza en la cuenca endorreica Oriental (4982 km²) en el extremo SE del Altiplano Mexicano (19° 24' N, 97° 24' W, 2300 m.s.n.m.), entre los estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala (Alcocer *et al.* 2001). Alchichica es el mayor de seis lagos "maars" o lagos cráter que se localizan en esta zona, los cuales son conocidos localmente como "axalapazcos" (Arredondo *et al.* 1984). Esta región se originó hace aproximadamente un millón de años durante el Cuaternario (Gasca 1981).

Este lago es el más profundo –conocido- de México con una profundidad máxima de 64m y una profundidad media de 38.55m (Alcocer *et al.* 2001); su forma es circular (diámetro de 1733 m), con un área de 1.81 km² y un perímetro de 5.06 km; la zona litoral presenta una pendiente pronunciada (Arredondo *et al.* 1983). Sus aguas provienen principalmente del manto freático y en menor proporción de la lluvia. Alchichica presenta aguas hiposalinas (i.e. $\approx 8.5\text{g/l}$, predominantemente sodio, cloro, bicarbonatos y carbonatos) con pH básico (aprox. 9 ± 0.1) (Alcocer *et al.* 1993, Vilaclara *et al.* 1993, citado por Alcocer *et al.* 2001).



Fig. 1. Lago Alchichica.

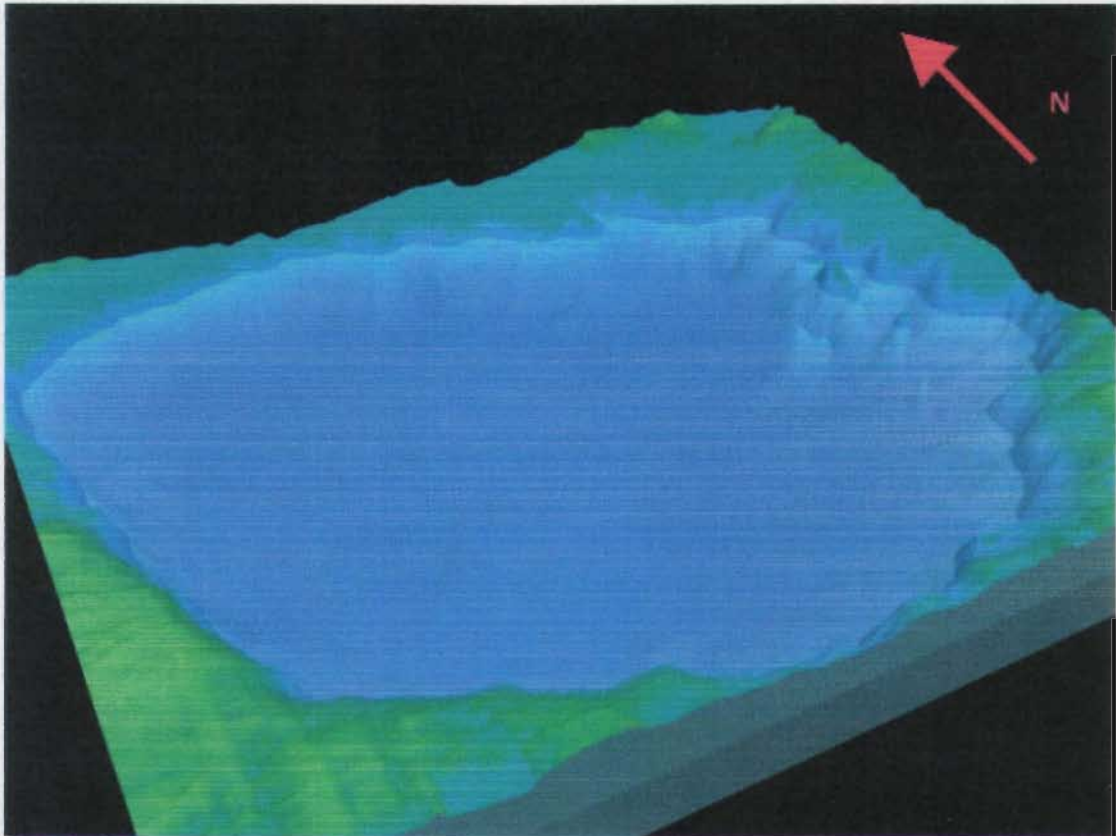


Fig. 2. Cuenca del lago Alchichica.

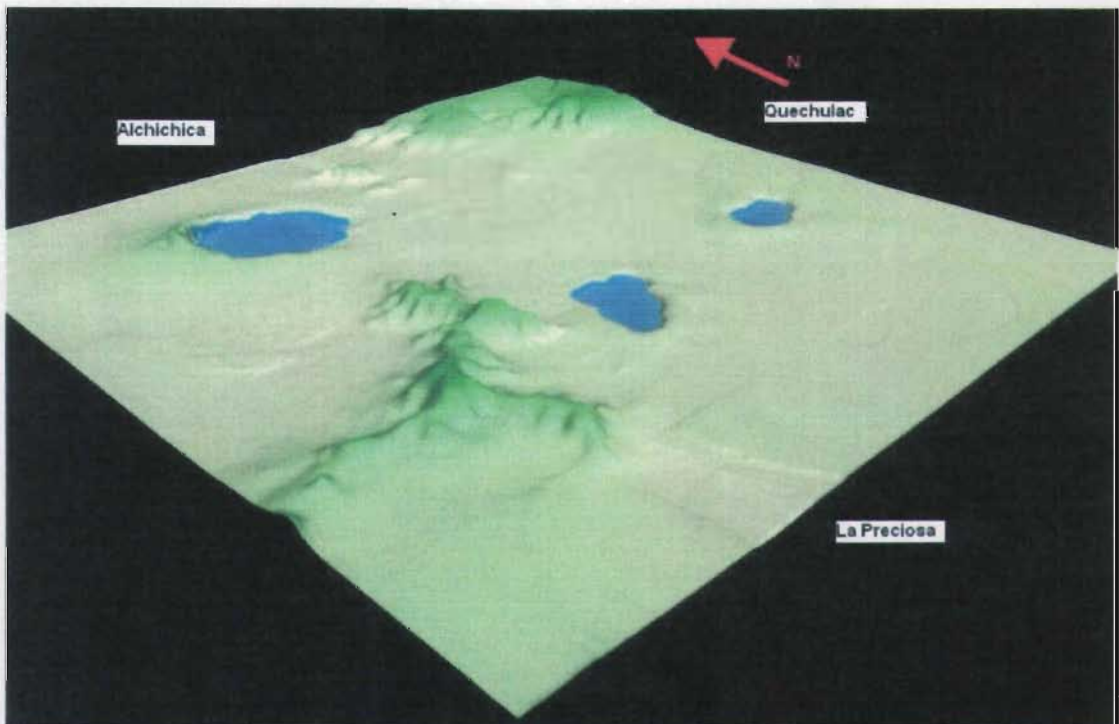


Fig. 3. Topografía de la región colindante al lago Alchichica, Puebla.

No obstante que el lago Alchichica se encuentra en una latitud tropical (19°24' N), el clima es templado seco debido a su elevada altitud. La temperatura media es de 12.9°C (Alcocer *et al.* 2001). Presenta dos épocas climáticas bien definidas; un verano caracterizado por lluvias y las temperaturas más altas (14.5-15.4°C) y el invierno, tiempo de secas y temperaturas bajas (9.2-13°C). Durante casi todo el año la evaporación es alta (500-600 mm) y la precipitación media anual es generalmente menor a 400 mm. Esta zona de alta evaporación y aridez, llamada Los Llanos de San Juan, puede ser considerada como un desierto frío (Alcocer 2001).

Alchichica es un lago monomítico cálido tropical. La época de mezcla comprende los meses de enero a marzo. La estratificación se extiende al resto del año (Alcocer *et al.* 2001). Esta estratificación en el lago Alchichica, se ha subdividido en tres periodos; estratificación temprana (marzo a mayo aproximadamente) cuando el perfil de temperatura comienza a mostrar una termoclina superficial, la estratificación bien establecida (junio a agosto aproximadamente), cuando la termoclina se encuentra bien desarrollada y se distinguen fácilmente el epi-, meta- e hipolimnion y la estratificación tardía, cuando la termoclina se vuelve angosta y se profundiza (septiembre a diciembre aproximadamente) (Adame 2004).

Alchichica presenta concentraciones de clorofila "a" generalmente bajas, con un valor promedio en la columna de agua inferior a 5 µg de clorofila "a"/L, por ello se le considera un lago oligotrófico (Margalef 1983). La profundidad de la zona eufótica varía entre los 15 y los 35 m (Oliva *et al.* 2001).

Se han registrado 19 especies de fitoplancton (Oliva *et al.* 2001) y nuevas especies se siguen describiendo (ver Anexo), siendo las diatomeas las mejor representadas en cuanto a riqueza específica. Durante el mes de enero, aproximadamente, se genera un florecimiento de éstas en toda la columna de agua registrándose los valores más altos de clorofila "a" en el año (Lugo *et al.* 2001). Por otra parte, durante el mes de mayo se presenta un florecimiento de la cianobacteria fijadora de nitrógeno *Nodularia spumigena* (Oliva *et al.* 2001).

Dominan el zooplancton dos especies de protozoarios; *Bodo caudatus* (flagelado) y *Cyclidium glaucoma* (ciliado) (Lugo 1993) así como dos especies de rotíferos (*Brachionus rotundiformis* y *Hexarthra jenkiniae*), y una especie de copépodo (*Leptodiptomus novamexicanus*), cuya distribución temporal varía durante el año siendo más abundante después de los florecimientos de diatomeas y cianofíceas (Lugo *et al.* 1999).

La biota animal superior de este lago está compuesta por dos especies endémicas; el pez *Poblana alchichica* (Atherinidae) (Buen 1945) y el "ajolote" *Ambystoma taylorii* (Amphibia, Ambystomidae) (Brandon 1981).

VII RESULTADOS

1. PARÁMETROS FÍSICOS

1.1 PARÁMETROS LACUSTRES

1.1.1 TEMPERATURA

Durante el periodo en estudio correspondiente a los años 1998-2002, se registró una temperatura promedio de $16.0 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ con un valor mínimo de 14.05°C y un máximo de 21.2°C (Tabla 2). El primer valor se encontró en el hipolimnion durante la circulación del año 2000 y el segundo en el epilimnion en la estratificación temprana del 2001.

La variación de la temperatura a lo largo del año fue similar en todos los años del periodo muestreado (Fig. 4). Sin embargo, es notorio a simple vista que durante 1998 el promedio anual ($16.46 \pm 1.69^{\circ}\text{C}$) fue aproximadamente medio grado más alto que el resto de los años muestreados (Tabla 2) y presentó un hundimiento de la termoclina (Fig. 5).

Tabla 2. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para cada año muestreado (1998-2002) y fechas donde se presentaron los valores máximos y mínimos

	1998	1999	2000	2001	2002
promedio	16.46 ± 1.79	15.9 ± 1.43	15.71 ± 1.56	15.78 ± 1.46	16.1 ± 1.6
N	461	572	443	506	506
min	14.54 Feb 17	14.71 Mar 3	14.05 Feb 15	14.43 Ene 16	14.63 Feb 23
max	20.12 May 11	20.77 May-11	19.65 Jun-15	21.20 May 30	19.77 May 10

Se encontraron diferencias significativas entre los estratos del lago ($F=43.67$; $p<0.01$) y los periodos del año ($F= 8.6$; $p<0.01$), siendo la estratificación temprana muy similar a la bien establecida (similitud = 0.97) y la circulación a la estratificación tardía (similitud = 0.27). Esta diferencia fue notoria sobre todo en el epilimnion (Fig. 6). Se observó que el periodo con el valor más altos de la columna de agua fue la estratificación bien establecida (promedio máximo de $19.08 \pm 0.56^{\circ}\text{C}$, en 1998) en el epilimnion y los más bajos en el periodo de circulación (promedio mínimo de $14.26 \pm 0.27^{\circ}\text{C}$ en 2000) (Tabla 3).

No se encontró una diferencia importante en las temperaturas de fondo de los años muestreados, presentando un valor promedio de 14.66°C con una desviación estándar de 0.25°C .

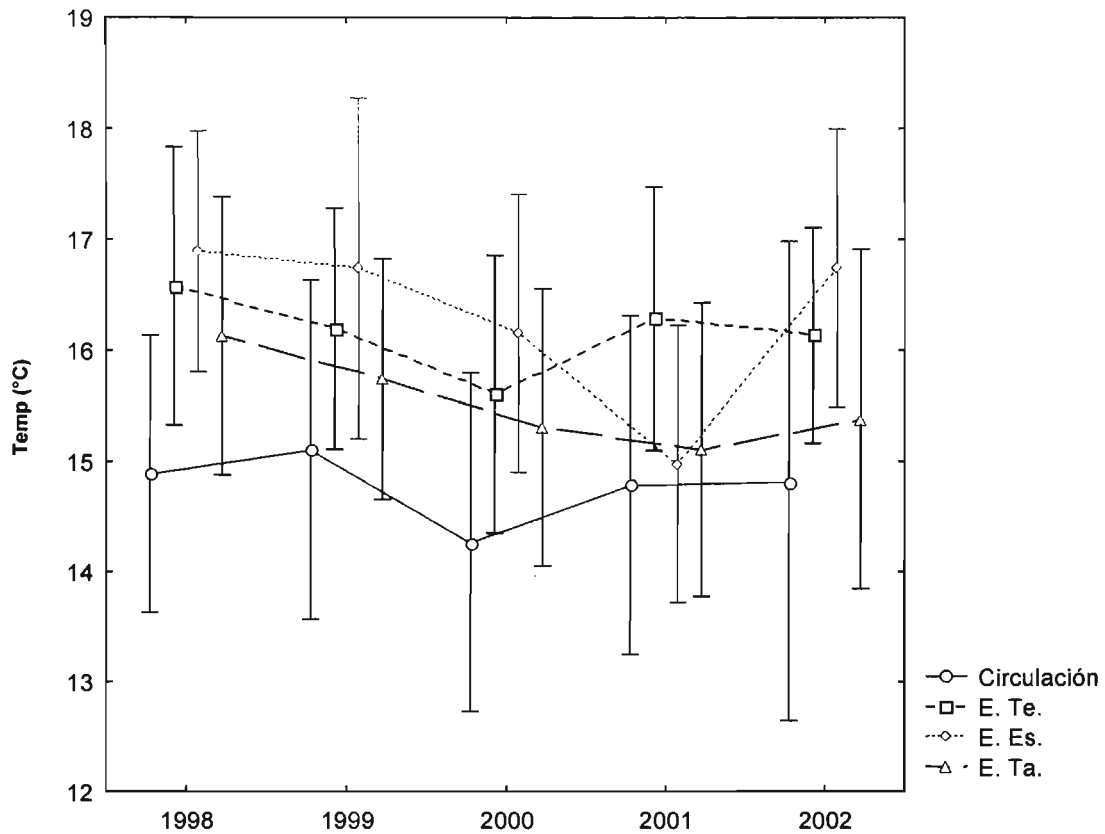


Fig. 4. Comparación de promedios de temperatura (°C) entre años y periodos. $F(12,154) = 0.38$ $p = n.s.$ (E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

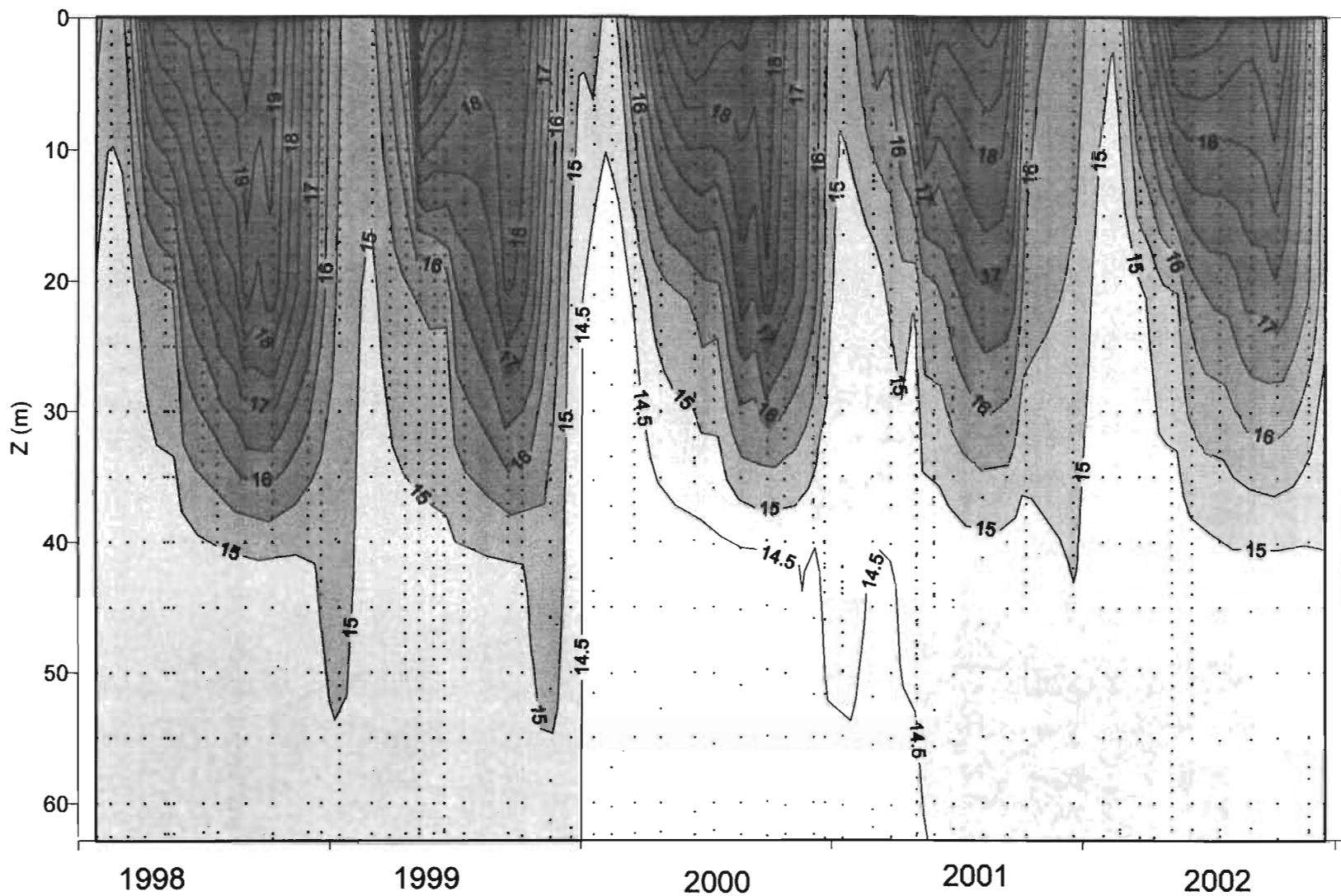


Fig. 5. Diagrama tiempo-profundidad (m) de isotermas durante 1998-2002. Se señalan con marcadores (°) los puntos e intensidad del muestreo.

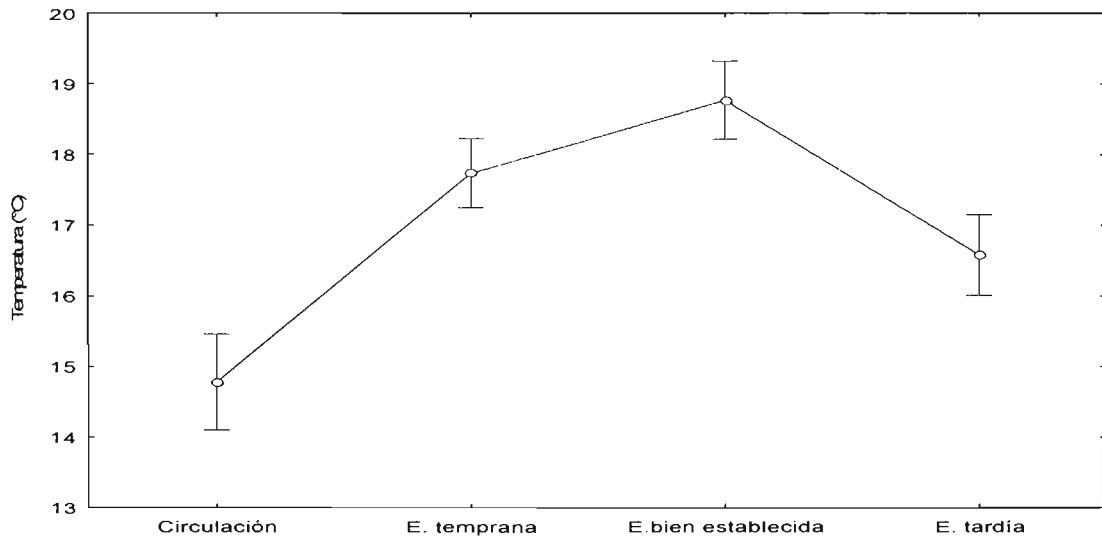


Fig. 6. Comparación de promedios de temperatura (°C) en el epilimnion entre periodos. $F(12,154)=0.31$; $p<0.01$. (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

Tabla 3. Valores de temperatura (° C) por época; circulación (A.), estratificación temprana, bien establecida y tardía (B) y por estrato (epi-, meta- e hipolimnion). (Las fechas indican el inicio del periodo).

A)

Circulación	
1998	28-Ene
T (°C)	14.88 ± 0.25
min-max	0.25 - 14.88
1999	15-Ene
T (°C)	15.13 ± 0.21
min-max	14.71 - 15.39
2000	08-Ene
T (°C)	14.26 ± 0.27
min-max	14.05 - 15.76
2001	16-Ene
T (°C)	14.78 ± 0.46
min-max	14.43 - 17.37
2002	30-Ene
T (°C)	14.81 ± 0.17
min-max	14.63 - 15.2

B)

Estratificación									
	Temprana			Bien establecida			Tardía		
1998		07-Abr			19-May			10-Oct	
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
T (°C)	18.38 ± 0.61	16.68 ± 1.05	14.79 ± 0.26	19.08 ± 0.56	16.97 ± 1.49	14.77 ± 0.12	17.26 ± 1.2	16.52 ± 1.59	14.78 ± 1.59
min-max	17.25 - 20.12	15.11 - 18.55	14.59 - 15.67	17.95 - 19.93	14.9 - 19.19	14.63 - 15.08	16.05 - 19.17	14.86 - 19.16	14.86 - 19.16
1999		07-Abr			19-May			10-Oct	
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
T (°C)	17.5 ± 1.39	16.13 ± 1.38	14.84 ± 0.09	18.68 ± 0.65	16.49 ± 1.08	14.92 ± 0.16	17.43 ± 1.06	15.90 ± 0.9	14.92 ± 0.1
min-max	15.86 - 20.76	15.86 - 20.76	14.73 - 15.18	17.96 - 19.73	15.26 - 18.67	14.77 - 15.45	15.81 - 19.44	15.02 - 18.34	14.8 - 15.17
2000		20-Mar			13-Jul			25-Oct	
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
T (°C)	17.22 ± 1.48	15.29 ± 1.12	14.19 ± 0.09	18.42 ± 0.22	15.75 ± 1.14	14.28 ± 0.09	16.16 ± 0.83	15.48 ± 1.0	14.28 ± 0.08
min-max	14.82 - 19.64	14.18 - 18.8	14.09 - 14.44	17.84 - 19.1	14.47 - 18.44	14.18 - 14.49	15.22 - 17.52	14.32 - 17.31	14.21 - 14.49
2001		28-Mar			27-Jun			11-Oct	
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
T (°C)	17.94 ± 1.12	15.84 ± 0.76	14.59 ± 0.11	18.77 ± 0.24	16.46 ± 1.21	14.67 ± 0.14	16.16 ± 1.11	15.44 ± 0.68	14.59 ± 0.04
min-max	16.14 - 21.19	14.67 - 17.6	14.47 - 15.08	18.22 - 19.5	14.86 - 18.84	14.5 - 15.01	15.1 - 19.57	14.66 - 17.46	14.53 - 14.66
2002		24-Mar			18-Jul			23-Nov	
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
T (°C)	17.57 ± 1.45	16.92 ± 1.56	14.74 ± 0.08	18.44 ± 2.61	16.62 ± 1.39	14.78 ± 0.07	16.17 ± 0.48	15.26 ± 0.44	14.72 ± 0.03
min-max	15.75 - 19.76	14.92 - 19.31	14.75 - 15.01	18.1 - 19.74	14.94 - 19.06	14.71 - 14.96	15.59 - 16.78	14.83 - 16.46	14.69 - 14.81

1.1.1.1 Metalimnion y Termoclina

En promedio, la termoclina se encontró entre los 19 ± 10m (tope) y los 30 ± 8m (base), con diferencias de temperatura promedio de 2.81 ± 1.31°C; la diferencia máxima fue de 4.9°C (estratificación bien definida, 2001) y la mínima de 0.11°C (estratificación tardía, 2000).

Se encontró una coincidencia entre el tope de la termoclina y el de la oxiclina como se observa en la Figura 7.

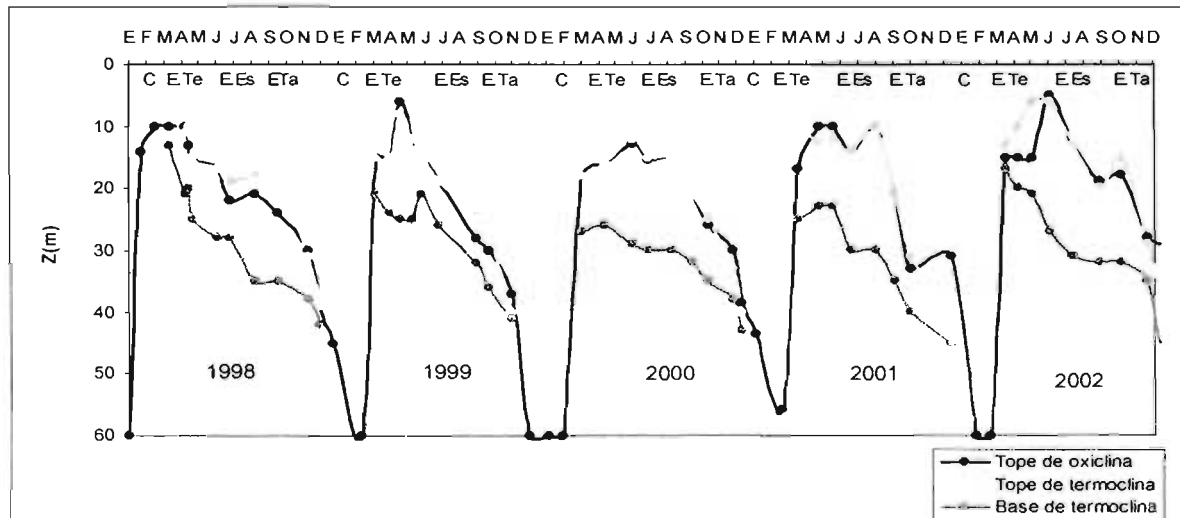


Fig. 7. Variación de la profundidad de la termoclina superior, inferior y oxiclina entre los años 1998-2002. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida y E.Ta.= estratificación tardía).

En esta misma figura se puede observar que existió una semejanza entre los cinco años de muestreo con relación al inicio de la formación de la termoclina y el metalimnion durante la estratificación temprana, su engrosamiento al acercarse la estratificación bien definida para luego adelgazar y profundizarse durante la estratificación tardía.

1.1.2 PAR Y ZONA EUFÓTICA

La Z_{EU} , presentó una variación cíclica permitiendo reconocer lo que Sommer (1986) denomina "fase de agua turbia", presente durante la circulación, y "fase de agua clara" durante la estratificación (Fig. 4, Tabla 4). Dentro de este último periodo, es importante mencionar que se presentaron periodos de inflexión en donde la Z_{EU} disminuye repentinamente a finales de la estratificación temprana (1998, 1999, 2001 y 2002), durante la estratificación bien establecida (1998, 2001) y a finales de la estratificación tardía (1999) (Fig. 8).

En promedio la Z_{EU} fue de 22.61 ± 6.6 m, con un valor promedio mínimo correspondiente a la circulación de 16.1 ± 2.1 m y un promedio máximo durante la época de estratificación tardía de 29.9 ± 6.8 m (Tabla 2).

Tabla 4. Profundidad (m) de la Z_{EU} por periodo durante el periodo 1998-2002.

	Circulación		Estratificación		
		Temprana	Bien establecida	Tardía	
promedio	16.1	19.3	23.8	29.9	
d.e.	2.1	2.2	4.3	6.8	
max	20.6	23.1	34.1	38.2	
min	13.4	16.1	16.8	18.6	

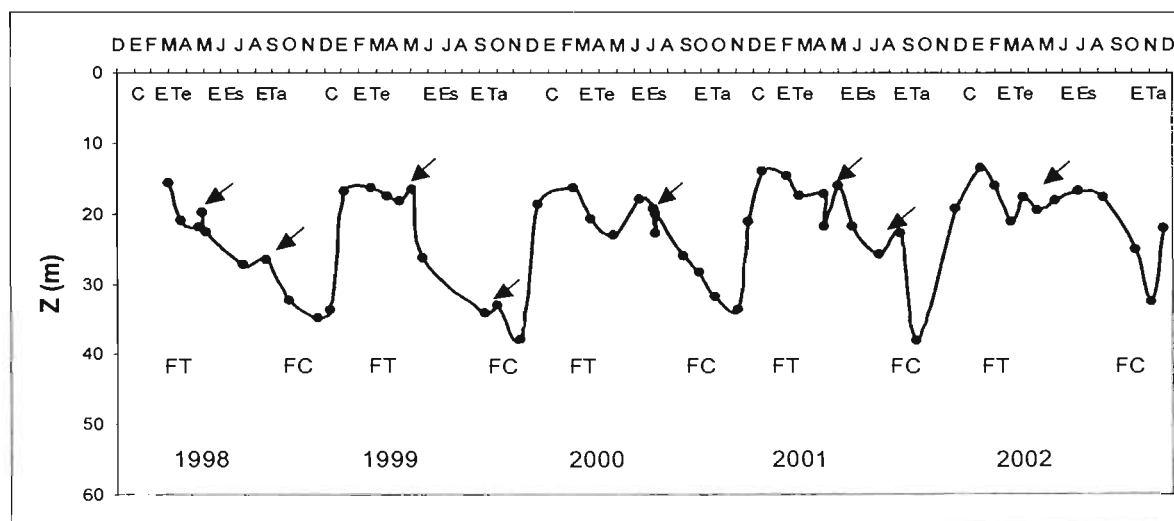


Fig. 8. Límite inferior de la Z_{EU} durante el periodo de 1999-2002. Las flechas indican puntos de inflexión. FC= fase de aguas claras: FT= fase de aguas turbias. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

Las variaciones de la Z_{EU} en el periodo de muestreo presentaron un patrón anual recurrente aunque con diferencias significativas entre los años 1998 y 2000 ($F=3.72$; $p<0.01$). Esta diferencia significativa se debió a una aparente tendencia en los cinco años muestreados de la Z_{EU} a disminuir de profundidad (Fig. 8), presentando un valor promedio máximo de profundidad en el año 1998 y disminuyendo hasta presentar su valor promedio mínimo en el 2002.

Por otra parte, se encontraron diferencias significativas entre periodos del año ($F= 75.98$; $p<0.01$), y entre los diferentes periodos dentro de la estratificación (temprana, bien establecida y tardía) ($F= 62.32$; $p<0.01$), siendo todos diferentes entre ellos (similitud <0.01). La estratificación tardía fue el periodo que presentó la Z_{EU} más profunda.

En general existió un acoplamiento entre la variación de la profundidad de la termoclina (metalimnion) y la variación de la Z_{EU} . La variación de la zona fótica con respecto a la termoclina (Fig. 9) mostró que el límite de la Z_{EU} se encuentra habitualmente entre el tope y la base de la termoclina.

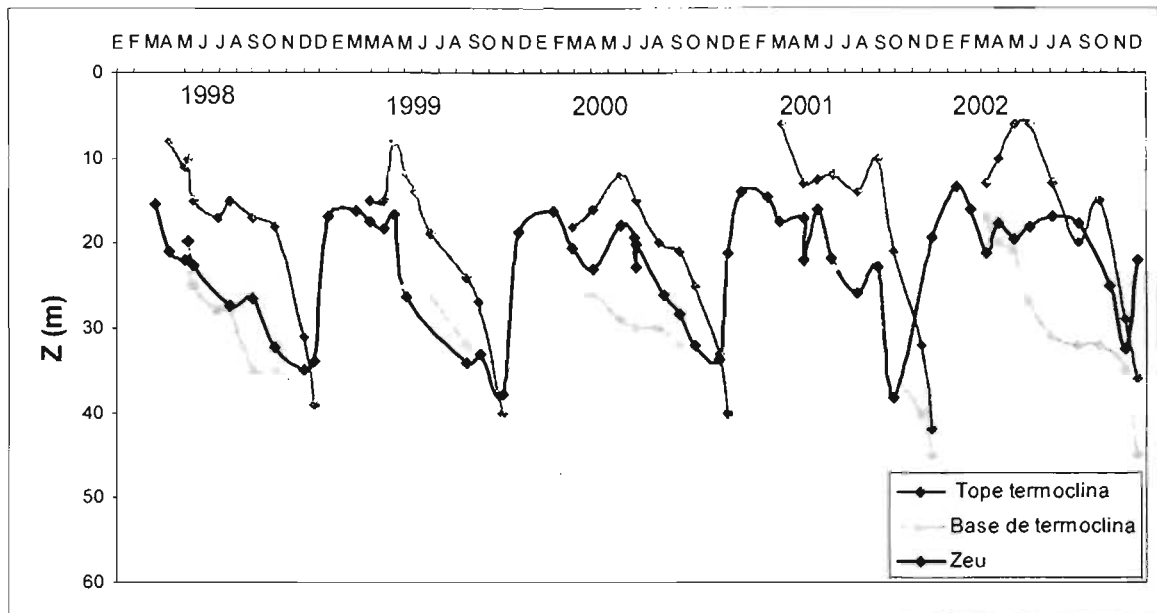


Fig. 9. Límite de la Z_{EU} con relación a la posición de la termoclina a lo largo de 1998-2002.

1.1.3 OXÍGENO DISUELTO

La concentración de OD -expresada en porcentaje de saturación- encontrada durante el periodo de muestreo (1998-2002) presentó un intervalo amplio, desde valores de anoxia (0%) hasta de sobresaturación (máximo 137%) (Tabla 5). La primera condición se desarrolló en el hipolimnion del lago a lo largo del periodo de estratificación, mientras que la segunda, estuvo presente en el epilimnion durante una etapa breve asociada al florecimiento de cianobacterias (mayo 2001). Bajo condiciones normales, el epilimnion se encontró ligeramente subsaturado con un

promedio de 94.26 ± 27.29 %. El promedio en toda la columna de agua y durante los cinco años muestreados fue de 55.96 ± 36.52 %.

Tabla 5. Valores de OD expresados en porcentaje de saturación (%) para cada año muestreado (1998-2002). Se indican las fechas donde se presentaron los valores máximos en cada año.

	1998	1999	2000	2001	2002
promedio	50.51 \pm 34.54	55.34 \pm 33.67	66.95 \pm 36.41	53.05 \pm 40.04	57.07 \pm 36.66
N	461	572	443	506	506
min-max	0-101.5	0-105.8	0-112.1	0-137.1	0-111.6
max	Jul-22	Sep-17	Jul-13	May-30	Jun-08

El perfil vertical de OD fue similar en los cinco años de muestreo y puede describirse de la siguiente manera; durante la circulación se encuentran concentraciones elevadas y más o menos homogéneas en la columna de agua (68.5 ± 20.79 %). Al finalizar ésta y desde la estratificación temprana hasta finales de la estratificación tardía, se presentan concentraciones altas y homogéneas en el epilimnion (89.86 ± 9.05 %), bajas y homogéneas en el hipolimnion (16.31 ± 18.66 %), y la presencia de una oxiclina en el metalimnion con un promedio de 57.94 ± 30.49 % (Fig. 10, Tabla 6).

Al comparar los valores de los cinco años, se encontraron diferencias significativas entre estrato ($F= 39.95$; $p<0.01$), con valores máximos en el epilimnion, entre periodo ($F= 182.78$; $p<0.01$), con máximos durante le circulación, y entre periodo de la estratificación ($F= 8.35$; $p<0.01$). La circulación fue similar a la estratificación temprana en cuanto a sus valores de OD (similitud= 0.99) y diferente a la estratificación bien establecida (similitud= 0.04) y tardía (similitud= 0.00). Por otra parte, el OD mostró diferencias significativas entre periodo/estrato ($F= 19.37$; $p<0.01$) y entre año/periodo ($F= 3.37$; $p<0.01$).

Estas dos últimas diferencias se pudieron observar a simple vista, ya que los años 2000 y 2002 presentaron los valores más altos de OD durante los periodos de circulación (2000 y 2002) y estratificación temprana (2002) (Fig. 10, 11) con elevados valores de OD distribuidos homogéneamente hasta el fondo del lago a diferencia de los años 1999 y 2001 los cuales presentaron valores más bajos de OD durante los periodos de circulación correspondientes y estos se distribuyeron de forma más heterogénea en la columna de agua. Es decir, que a pesar de presentar una columna de agua homeoterma, las concentraciones de OD presentaron un gradiente a partir de los 40-50 m aproximadamente, inclusive en el año 2001, se hallaron condiciones anóxicas en periodo característico de circulación (16 de enero).

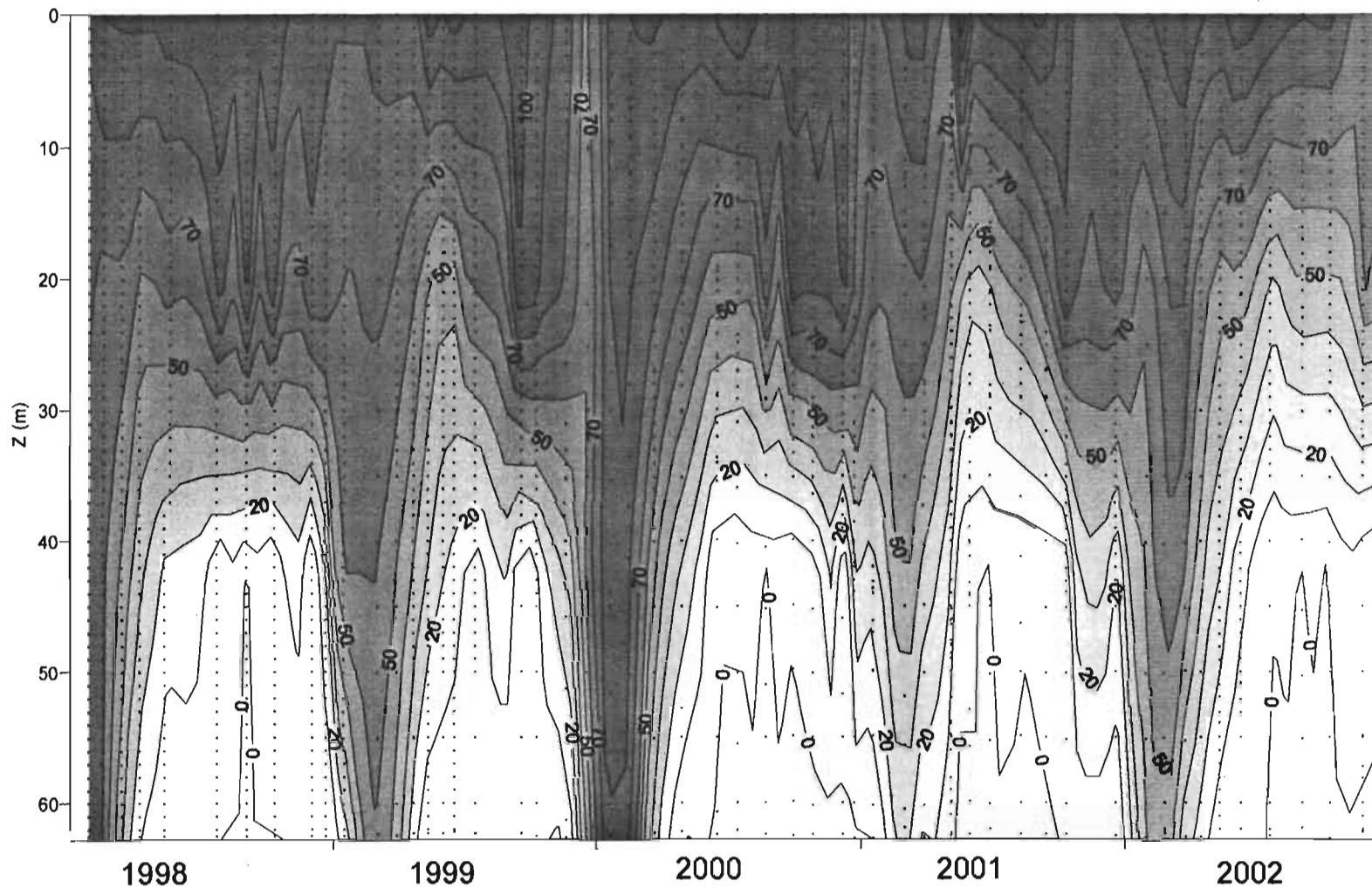


Fig. 10. Diagrama tiempo-profundidad de isopletas de la concentración de OD (%) durante los años 1998-2000. Se señalan con marcadores (°) los puntos e intensidad del muestreo.

Tabla 6. Valores de OD expresadas como porcentaje de saturación (%) por periodo; circulación (A), estratificación temprana, bien establecida y tardía (B) y por estrato (epi-, meta- e hipolimnion). (Las fechas indican el inicio del periodo.)

A)

Circulación	
1998	28-Ene
DO (%)	65.65 ± 13.26
min-max	19.07-95.3
1999	15-Ene
DO (%)	63.56 ± 18.8
min-max	11.7-85.1
2000	08-Ene
DO (%)	91.75 ± 6.93
min-max	75 - 101.6
2001	16-Ene
DO (%)	55.77 ± 29.88
min-max	0 - 97.1
2002	30-Ene
DO (%)	77.44 ± 20.99
min-max	36.4 - 105.6

B)

Estratificación									
	Temprana			Bien establecida			Tardía		
1998		07-Abr		19-May			10-Oct		
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
DO (%)	90.12 ± 1.61	85.26 ± 3.46	37.13 ± 16.97	93.56 ± 2.78	69.49 ± 26.11	7.5 ± 11.46	80.88 ± 6.69	43.45 ± 34.15	0 ± 0
max	92.39	89.53	79.4	101.5	95.7	43.4	96.0	91.9	0.0
min	87.18	81.6	6.28	89.6	7.6	0.0	67.5	0.0	0.0
1999		29-Mar		16-Jun			17-Sep		
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
DO (%)	90.37 ± 7.64	90.37 ± 7.64	32.3 ± 13.26	89.92 ± 5.66	76.26 ± 17.12	33.35 ± 7.81	92.91 ± 8.61	59.82 ± 43.03	2.69 ± 3.67
min-max	82.3 - 105.7	82.3 - 105.7	0.7 - 63.8	90.2 - 105.8	20.5 - 103.8	0.6 - 39.4	67.2 - 104.2	0 - 115.8	0 - 19.1
2000		20-Mar		13-Jul			25-Oct		
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
DO (%)	97.89 ± 4.61	65.72 ± 23.44	24.39 ± 25.88	97.4 ± 6.93	40.85 ± 30.98	0.1 ± 0.54	86.52 ± 7.72	44.26 ± 35.31	0 ± 0
min-max	87.8 - 105.2	17 - 100.8	0 - 60.5	89.4 - 112.1	0 - 106.4	0 - 2.8	69.2 - 98.4	0 - 92	0 - 0
2001		28-Mar		27-Jun			11-Oct		
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
DO (%)	103.57 ± 15.17	70.58 ± 18.65	18.4 ± 12.98	100.4 ± 5.43	38.84 ± 33.14	3.44 ± 4.47	89.32 ± 15.91	18.59 ± 25.74	0.81 ± 0.56
min-max	89.3 - 137.1	34.1 - 92.1	0 - 53.1	86.7 - 109.2	0 - 103.7	0 - 14.1	19.5 - 116.8	0 - 78.5	0 - 1.6
2002		24-Mar		18-Jul			23-Nov		
	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>	<i>epi-</i>	<i>meta-</i>	<i>hipo-</i>
DO (%)	103.68 ± 7.25	81.38 ± 22.45	31.02 ± 22.17	89.31 ± 13.49	31.43 ± 34.94	0 ± 0	69.53 ± 4.15	12.84 ± 22.11	0 ± 0
min-max	89.1 - 111.6	22.3 - 107.9	0 - 84.4	80.3 - 99.8	0 - 94	0 - 0	54.2 - 78.9	0 - 65.8	0.0

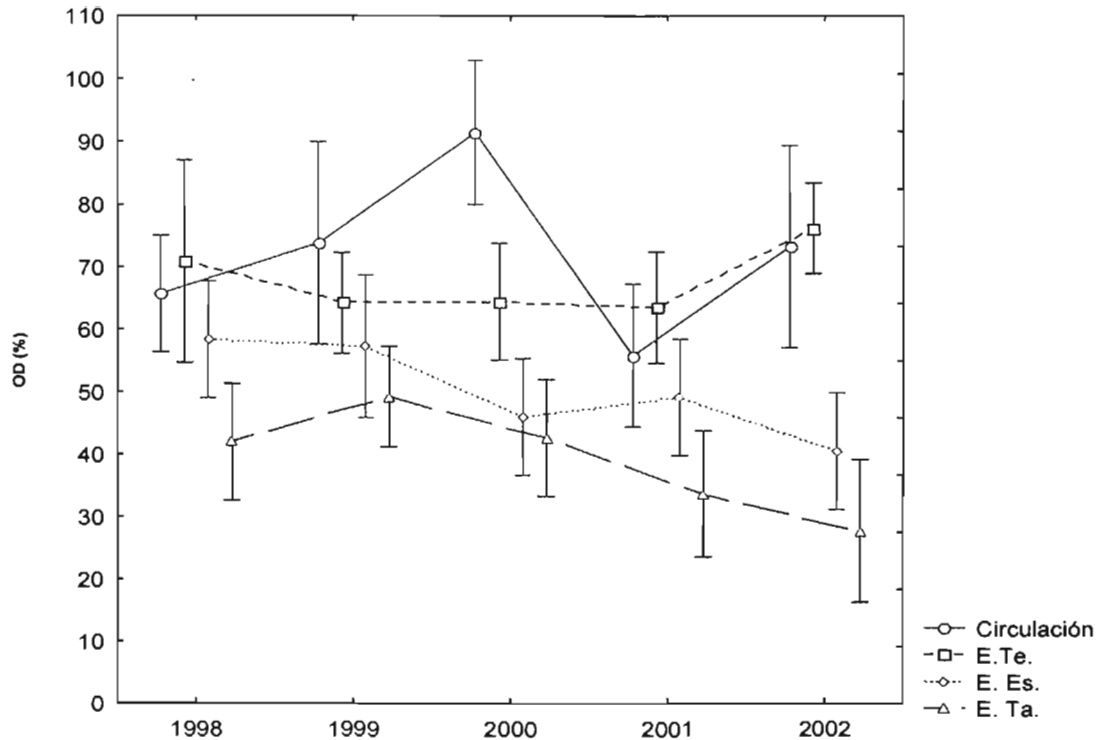


Fig. 11. Comparación de promedios por periodo y por año del porcentaje de saturación del OD (%). $F(12,103) = 3.37$; $p < 0.01$. (E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

1.1.3.1 Capa de Mezcla

Se presentaron variaciones en la columna de la Z_{MIX} relacionados con la hidrodinámica del lago.

La Z_{MIX} abarcó durante la circulación toda la columna de agua salvo a principios del año 1999 y 2001, años en los cuales, como ya se mencionó anteriormente, presentaron un gradiente de OD a partir de los 45m (1999) e inclusive un fondo anóxico desde los 48m. Tan pronto como dio inicio la estratificación, Z_{MIX} se fue reduciendo (estratificación temprana: 12.9 ± 3.4 m, con un mínimo de 5m). Al ir avanzando la estratificación, la profundidad de Z_{MIX} comenzó a aumentar hacia la estratificación bien establecida (16.1 ± 3.8 m) y la tardía (30.1 ± 5.2 m, con un máximo de 39m) hasta abarcar nuevamente toda la columna de agua durante el siguiente periodo de circulación a finales o principios del siguiente año (Fig. 12).

Es importante hacer notar las importantes variaciones que existen en la profundidad de Z_{MIX} (flechas en Fig. 12) inclusive dentro del periodo de estratificación. Durante los periodos de estratificación bien establecida y tardía se encontraron variaciones en la profundidad de Z_{MIX} ; aumentos (1998, 2001 y 2002) y disminuciones (1999, 2002) (Fig. 12).

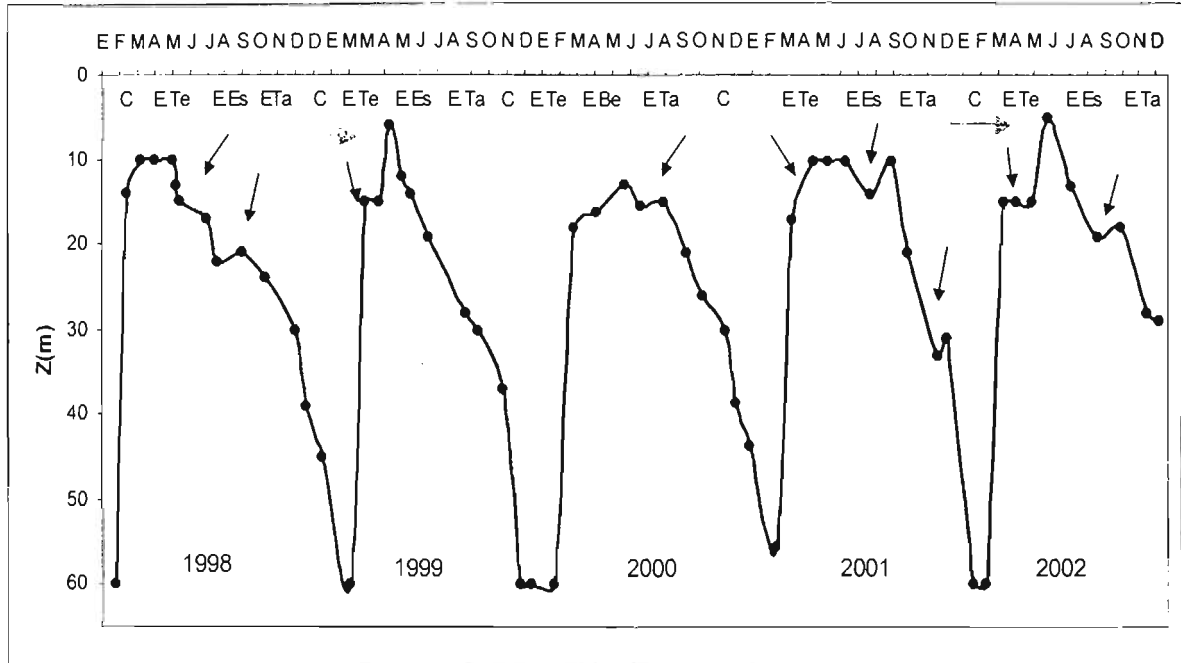


Fig. 12. Grosor de la Z_{MIX} durante los años 1998-2002. Las flechas negras señalan aumentos en la profundidad de Z_{MIX} ; las flechas grises, disminuciones de la profundidad. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida y E.Ta.= estratificación tardía).

Al comparar estadísticamente los cinco años, se encontraron variaciones significativas entre periodos del año ($F=68.70$; $p<0.01$), siendo todos diferentes entre ellos (similitud < 0.01) a excepción de la estratificación temprana y bien (similitud= 0.82) y entre periodos de la estratificación ($F= 54.94$; $p<0.01$). La diferencia entre años no fue significativa, sin embargo, podemos observar que existieron diferencias en la profundidad de la Z_{MIX} entre los periodos de circulación de los años que presentaron una capa de mezcla hasta el fondo (con relación al OD) (1999 y 2001) y los años en los que esto no sucedió (Fig. 13).

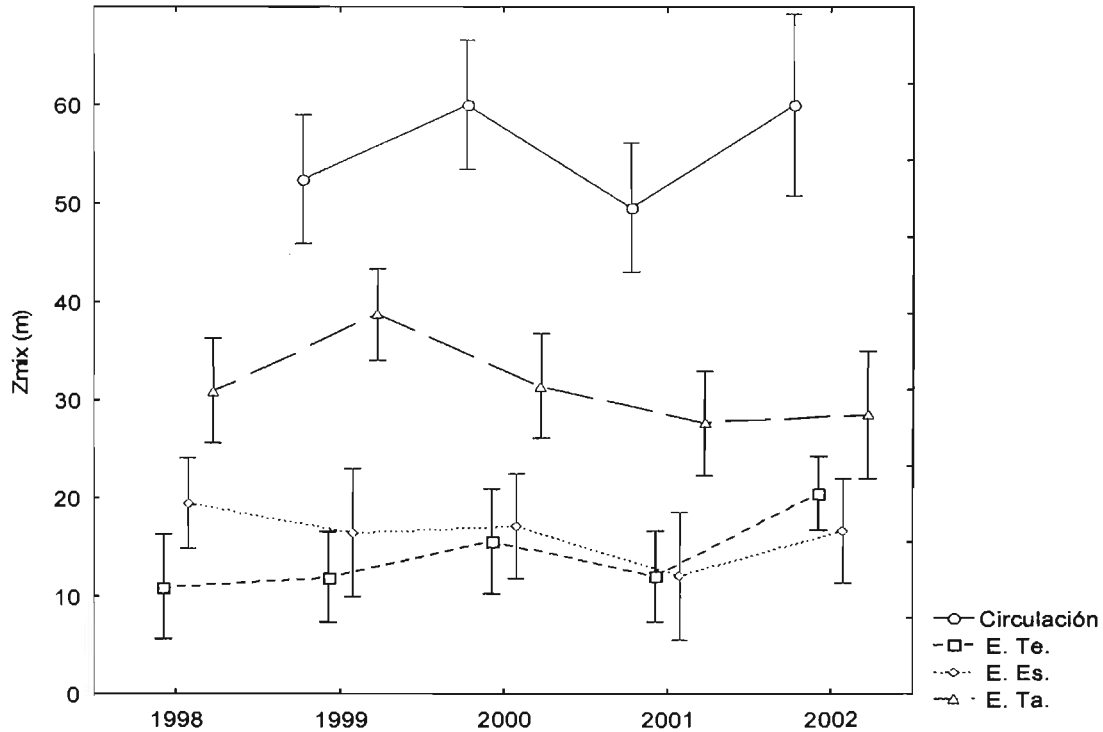


Fig. 13. Comparación de promedios entre periodos y entre años de la Z_{MIX} (m). $F(11,149) = 2.09$; $p = n.s.$ (E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

1.1.4 ESTABILIDAD DE LA COLUMNA DE AGUA

La columna de agua en el lago Alchichica presentó variaciones cíclicas con relación a la estabilidad de la columna de agua. Se observó una resistencia baja o nula durante la época de circulación y un aumento de ésta durante la estratificación (Fig. 14 y 15). Estadísticamente esta diferencia fue significativa mostrando al periodo de estratificación bien establecida como aquel de máxima estabilidad ($F=13.2$; $p<0.01$), seguida de la estratificación tardía, periodo que en ocasiones presentó los máximos del año (1999, 2001) (Fig. 14).

Por otra parte los periodos de circulación de los años 2000 y 2002 presentaron menor estabilidad que el resto de los años con valores bajos presentes desde finales de la estratificación tardía del año anterior (diciembre).

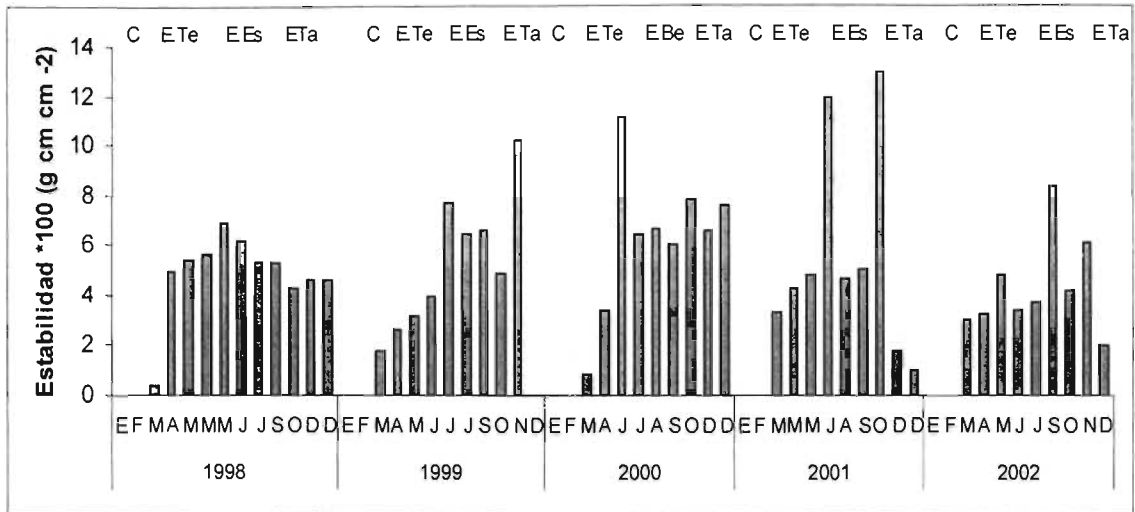
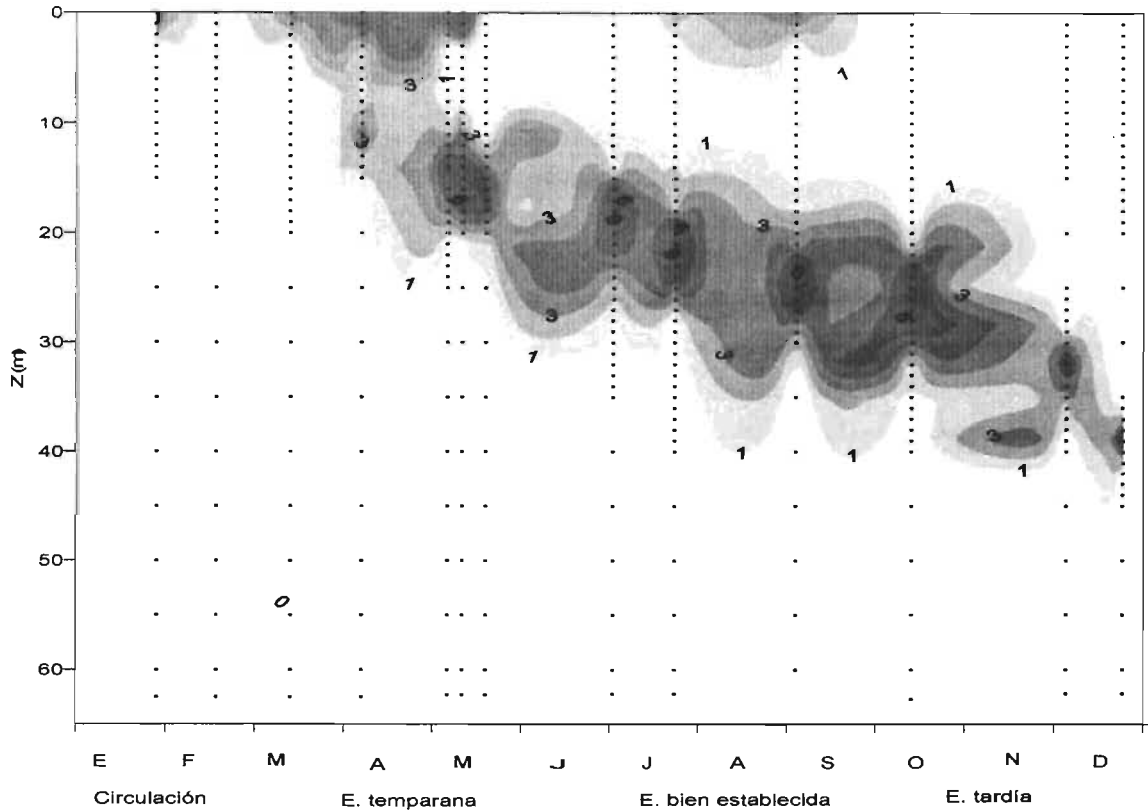
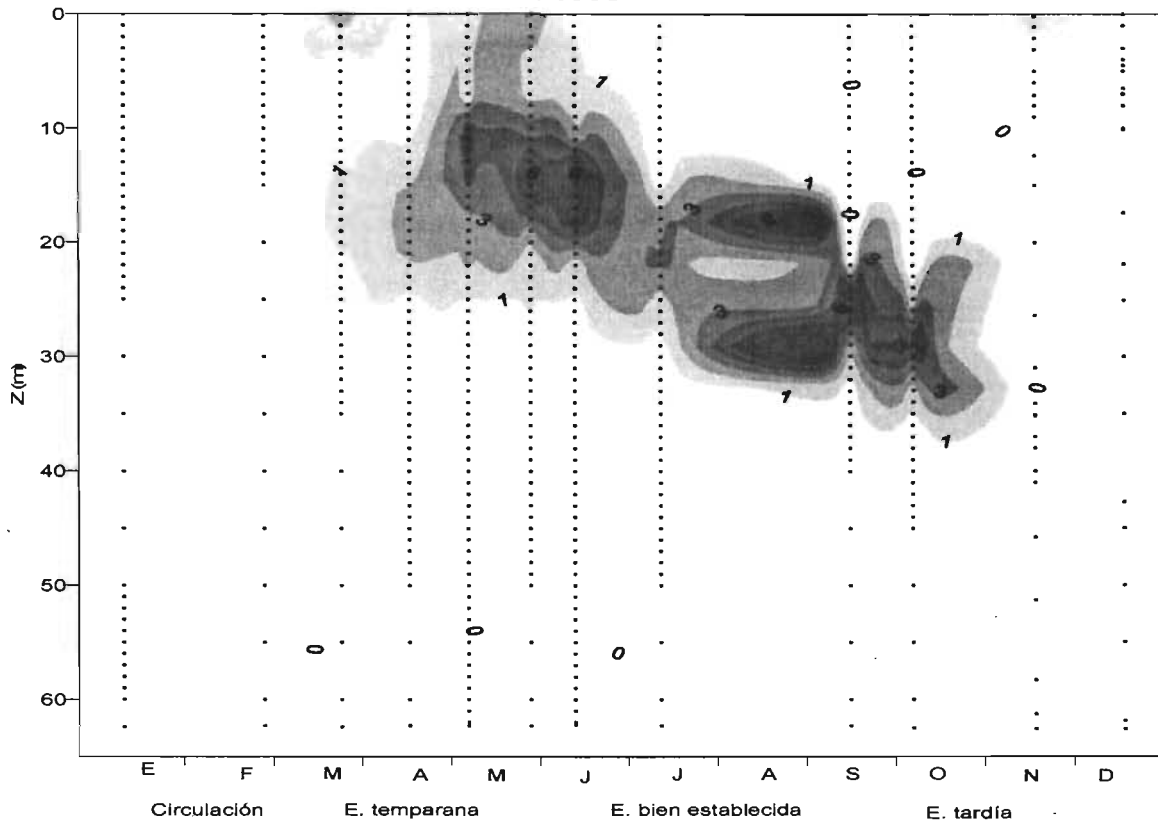


Fig. 14. Estabilidad ($\text{mg}/\text{cm}^3/\text{cm}$) de la columna de agua durante el periodo 1998-2002. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida y E.Ta.= estratificación tardía).

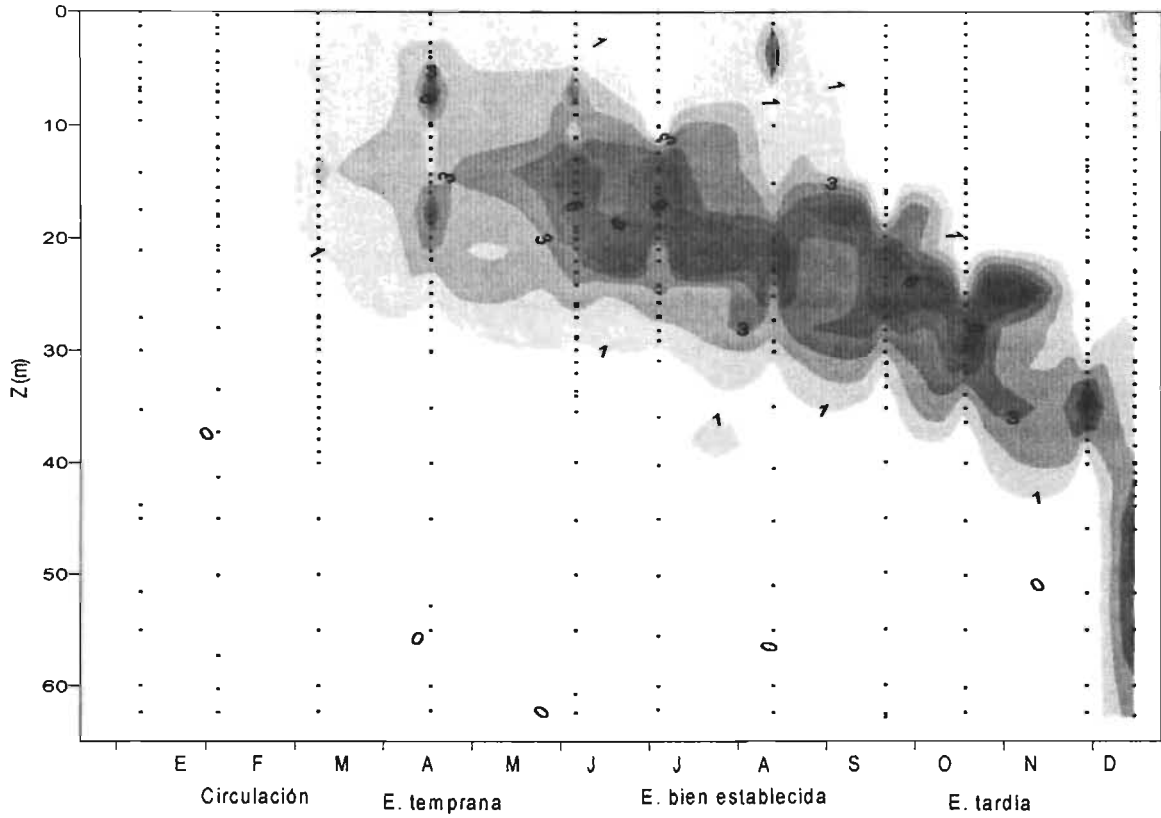
Con relación a la estabilidad de la columna de agua en profundidad (Fig. 15), se observó que los valores máximos se encontraron entre los 10-30 m, valores correspondientes a la termoclina planar. Estos valores de estabilidad máxima, se fueron profundizando conforme avanzó el año hasta llegar a casi 40 m durante la estratificación tardía.



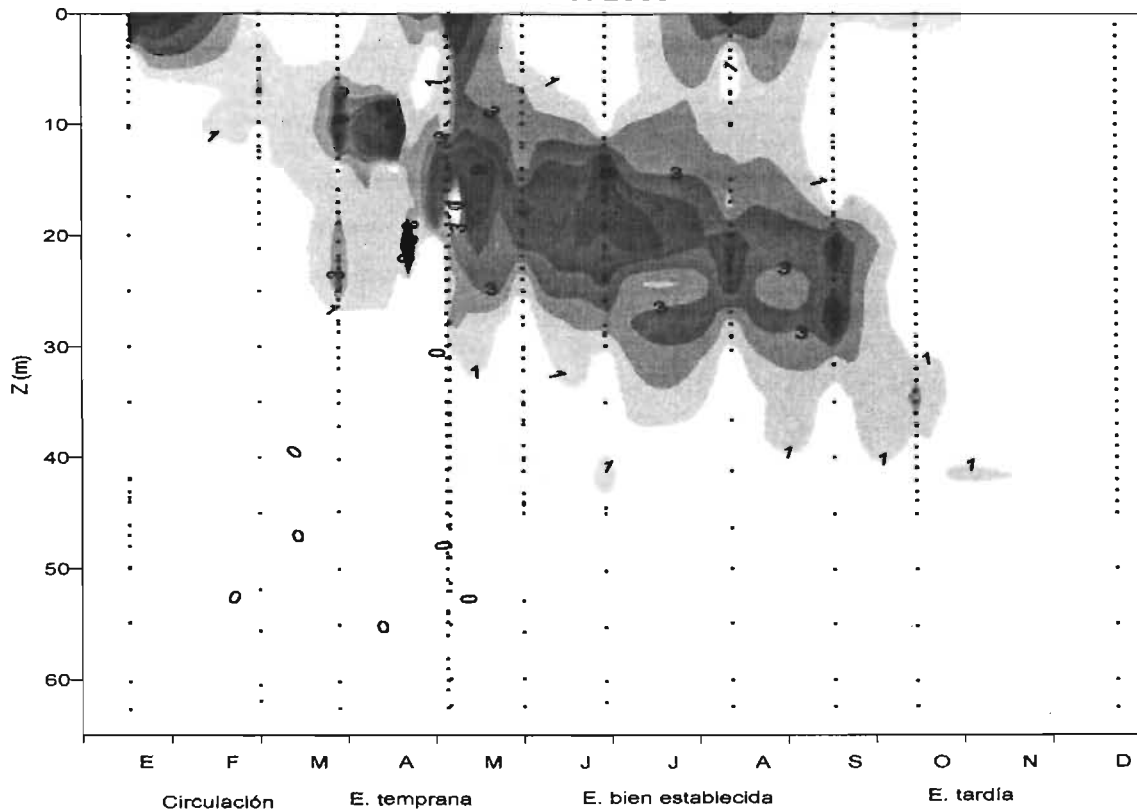
A. 1998



B. 1999



C. 2000



D. 2001

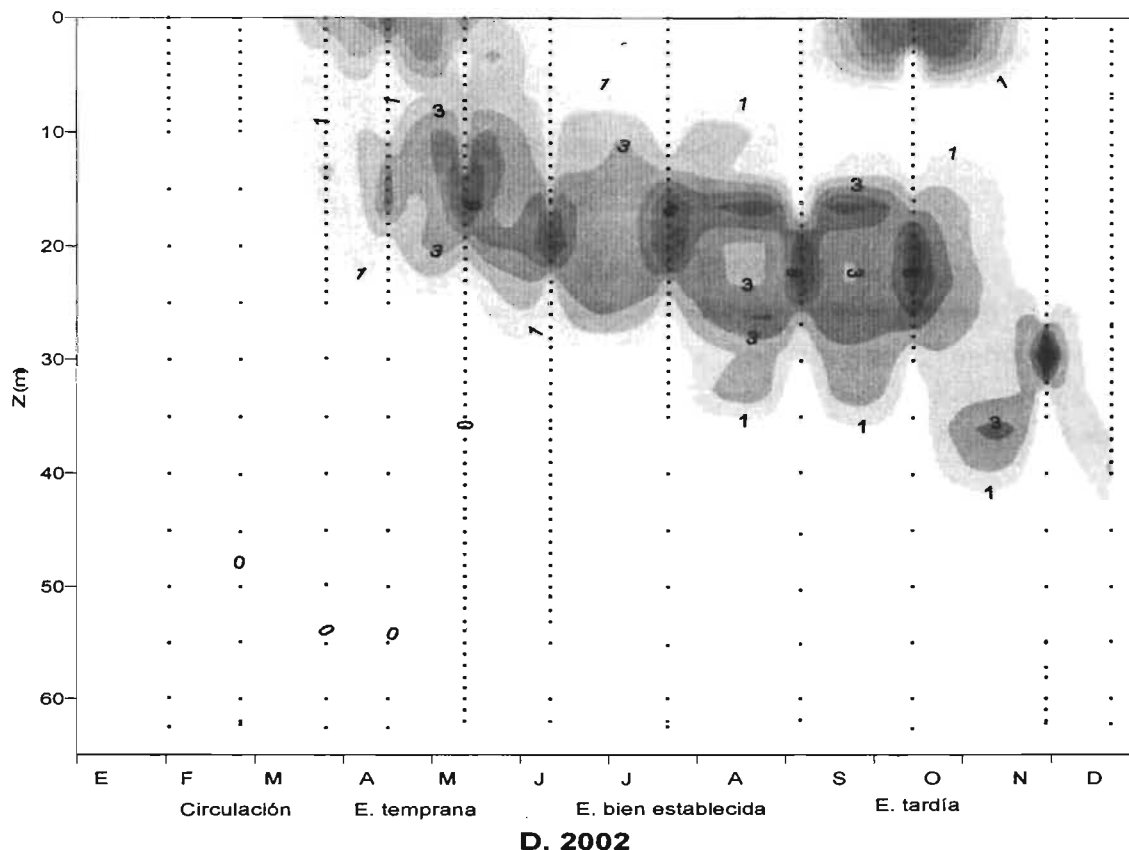


Fig. 15. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de estabilidad durante los años 1998-2002. Se señalan con marcadores (·) los puntos e intensidad de muestreo.

1.1.5 NUTRIENTES

Los datos de nutrientes utilizados en este estudio (tomados de Sánchez, 2005) serán descritos de manera muy superficial, sólo se retomaran algunos puntos que serán útiles para discutir los resultados en la siguiente sección.

Los nutrientes analizados mostraron los siguientes promedios; $\text{NO}_3 = 0.66 \pm 0.76 \mu\text{mol/L}$, $0.01\text{-}5.12 \mu\text{mol/L}$; $\text{NO}_2 = 0.09 \pm 0.08 \mu\text{mol/L}$, $0.02\text{-}0.49 \mu\text{mol/L}$; $\text{PO}_4 = 1.08 \pm 1.22 \mu\text{mol/L}$, $0.01\text{-}6.4 \mu\text{mol/L}$; $\text{NH}_4 = 7.22 \pm 8.25 \mu\text{mol/L}$, $0.07\text{-}43.71$, $\text{SiO}_4 = 6.29 \pm 6.89 \mu\text{mol/L}$, $0.2\text{-}37.4 \mu\text{mol/L}$.

En particular, los nutrientes presentes en la termoclina durante la estratificación bien establecida presentaron los siguientes valores promedios: $\text{NO}_3 = 0.69 \pm 0.54 \mu\text{mol/L}$; $\text{PO}_4 = 0.39 \pm 0.36 \mu\text{mol/L}$; $\text{NH}_4 = 5.61 \pm 3.9 \mu\text{mol/L}$ y $\text{SiO}_4 = 3.43 \pm 5.68 \mu\text{mol/L}$.

En particular y con relación al PO_4 y NH_3 se pudo reconocer que los valores máximos se presentaron durante la circulación seguidos de la estratificación tardía. Los valores mínimos se presentaron durante la estratificación bien temprana de los años 1999 y 2001.

El NH_4 presentó valores significativamente más altos durante la estratificación tardía del año 2000 y 2002. Por otra parte, el NO_3 presentó sus máximos valores en el año 2001 seguido del año 1999.

Finalmente con relación a la distribución en la vertical, ésta fue de forma heterogénea durante toda la estratificación concentrándose principalmente en el hipolimnion y homogénea durante la circulación. Sin embargo, dentro de este último periodo se encontraron diferencias, ya que el año 2001 presentó la máxima heterogeneidad –medida como el porcentaje de la desviación estándar con relación a la media- en cuanto a todos los nutrientes estudiados, en contraparte, los años 2000 y 2002 presentaron la mínima heterogeneidad (Tabla 7).

Tabla 7. Heterogeneidad máxima (%) en la columna de agua durante el periodo de circulación de NH_4 , PO_4 , NO_3 y SiO_4 .

	1999	2000	2001	2002
NH4	6.40	8.45	66.93	5.99
PO4	95.31	26.42	68.15	22.42
SiO4	7.20	42.39	126.26	88.53
NO3	4.92	5.77	8.11	6.87

1.2 PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS

Los parámetros ambientales medidos de la región donde se encuentra el lago Alchichica y proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (1966-2001), así como aquellos obtenidos *in situ*, se analizaron por separado. No obstante, ambos grupos de datos mostraron patrones de variación similares con periodicidad anual; dentro de ésta, se observaron claramente dos épocas diferentes, la de lluvias (junio-noviembre, aproximadamente) y la de secas (el resto del año). Se encontraron diferentes periodos que concuerdan con la hidrodinámica del lago (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía), por lo que durante la descripción de los parámetros meteorológicos se hará referencia a ellas.

1.2.1 MARCO CLIMÁTICO DE LA REGIÓN

Con base en los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional del periodo 1966-2001, se obtuvo el marco climático del área en donde se encuentra el lago Alchichica. Esta información se dividió en cuatro parámetros principales que comprenden: la temperatura del aire, la precipitación, la niebla y la evaporación.

1.2.1.1 TEMPERATURA DEL AIRE

Durante el periodo 1966-2001 se observó un rango amplio de temperaturas del aire; desde $-15\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $38\text{ }^\circ\text{C}$, con una temperatura media de $13.45 \pm 2.3\text{ }^\circ\text{C}$ (Tabla 8, Fig. 16).

Tabla 8. Temperatura del aire (°C) del periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

Temperatura aire (°C)					
	Máxima extrema	Máxima promedio	Media	Minima extrema	Minima promedio
promedio	25.73	21.53	13.45	-0.14	5.36
d.e.	2.78	2.23	2.30	4.53	3.39
max	38.00	29.45	18.05	11.00	11.75
min	21.00	9.00	7.83	-15.00	-2.69

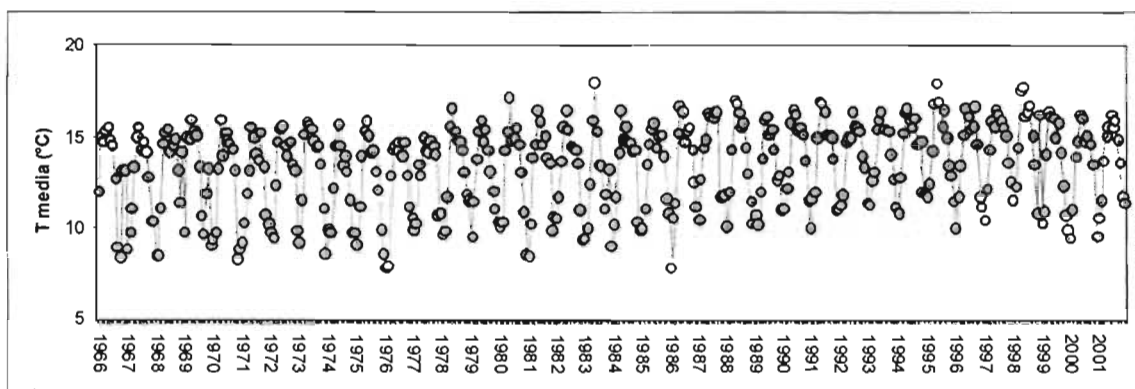


Fig. 16. Temperatura promedio (°C) del aire en el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

Al observar con detalle los datos de los años comprendidos en este estudio (1998-2001) se encontró un patrón que se repite anualmente (Fig. 17). Los valores bajos de temperatura se presentaron durante el periodo de circulación invernal del lago. Posteriormente, la temperatura comenzó a elevarse y alcanzó su máximo durante la estratificación temprana (primavera), aproximadamente de marzo a junio. En la estratificación bien establecida, (verano) aproximadamente de julio a septiembre, la temperatura del aire disminuyó. Finalmente, durante la estratificación tardía del lago, aproximadamente de octubre a diciembre, se presentó un ligero aumento seguido de una disminución que da paso nuevamente a la circulación (Fig. 17 y 18). Entre estos cuatro años hubo una variación anual que aunque no fue significativa, mostró que el año con los valores más bajos fue el 2000 y los más altos el 1998.

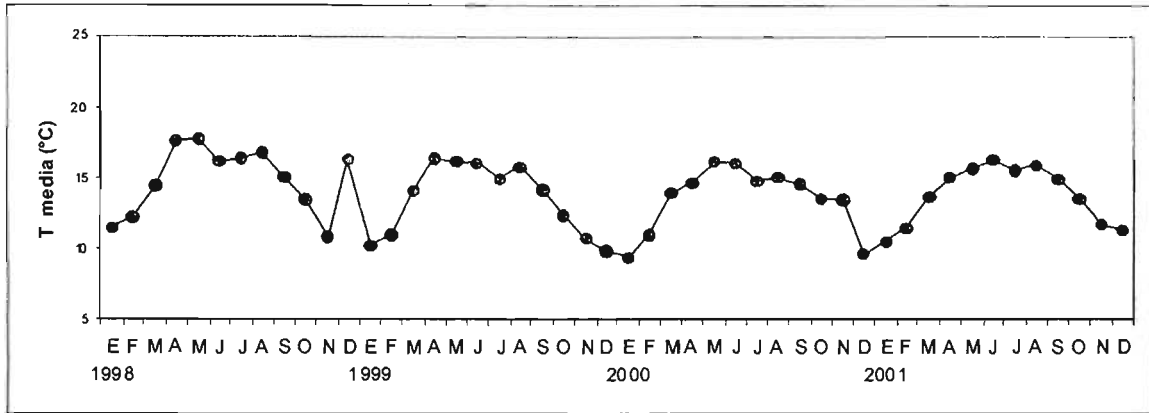


Fig. 17. Temperatura media (°C) mensual durante 1998-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

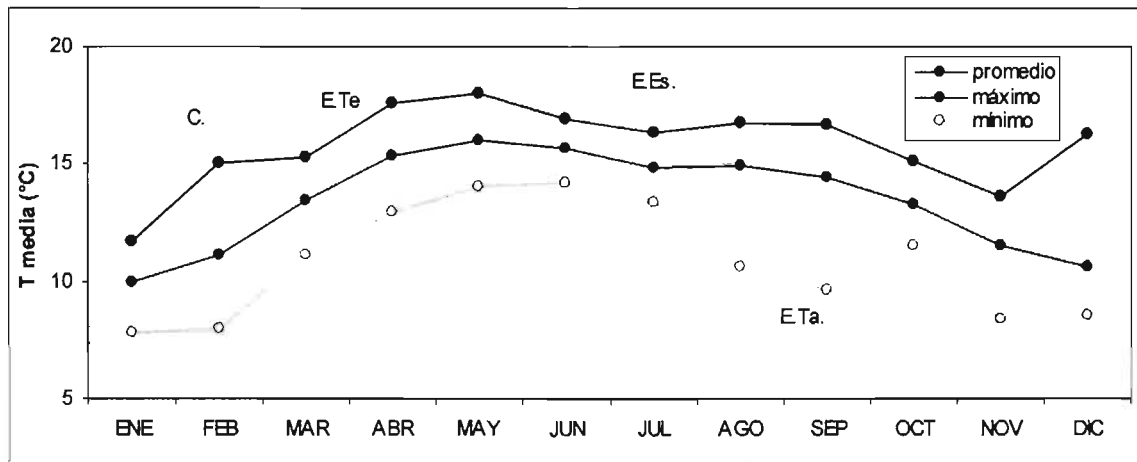


Fig. 18. Promedio de la temperatura media (°C) mensual durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional). (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

1.2.1.2 PRECIPITACIÓN

La región dónde se encuentra el lago Alchichica presentó una precipitación con valores bajos de lluvia máxima mensual (promedio de 1966-2001 de $14.23 \pm 19.88\text{mm}$) y de lluvia total mensual (promedio de los años 1966-2001 de $37.28 \pm 56.62\text{mm}$) (Tabla 9). En un valor promedio (1966-2001) de la lluvia acumulada en un año (precipitación anual), la precipitación tuvo un valor de $435.55 \pm 160.02\text{mm}$ anuales, con un máximo anual en el año 1969 (1094.5 mm) y un mínimo anual en 1986 (233.4mm) (Fig. 19).

Tabla 9. Precipitación mensual (mm) máxima y total durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

Lluvia (mm)			
	Máxima	Total	fecha
promedio	14.23	37.28	
d.e.	19.88	52.62	
max	213.60	514.20	octubre 69
min	0.00	0.00	

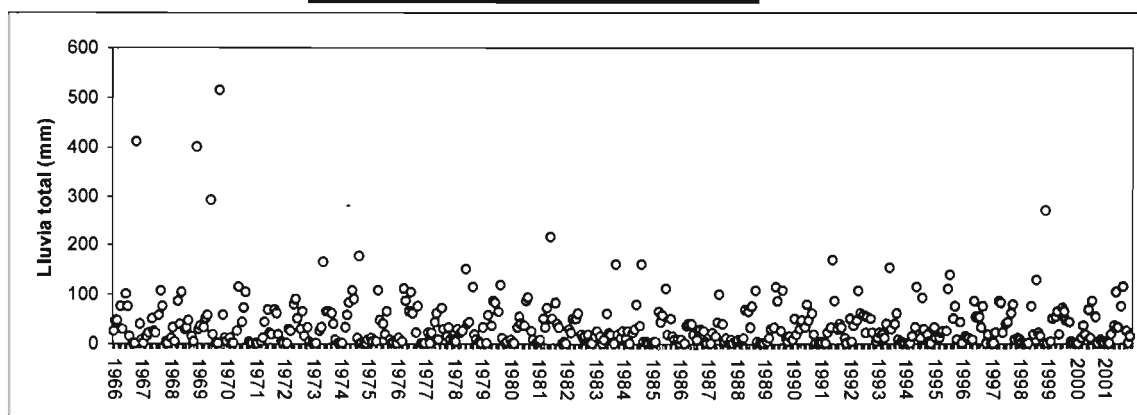


Fig. 19. Precipitación total (mm) anual durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

Los datos del periodo 1966-2001 permitieron ubicar la época de lluvias en la región del lago Alchichica en el verano, a partir de junio y hasta octubre y la de secas durante el resto del año (diciembre a mayo). Esta diferencia de épocas fue significativa ($F=2.93$; $p<0.05$). Sin embargo, en una ocasión (1998) se encontraron tormentas en el mes de diciembre, mes no incluido en la época de lluvias (Fig. 20, 21,22).

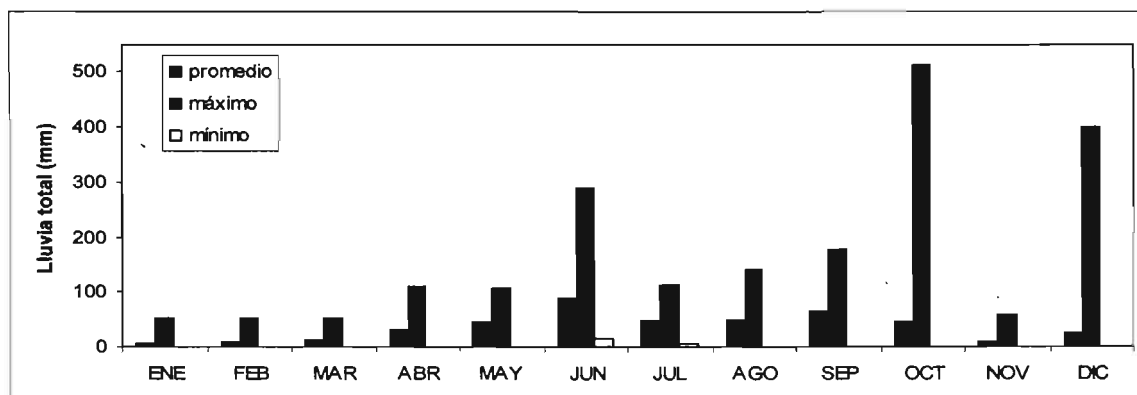


Fig. 20. Promedio mensual, máximo y mínimo de la precipitación total acumulada (mm) por mes durante el periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

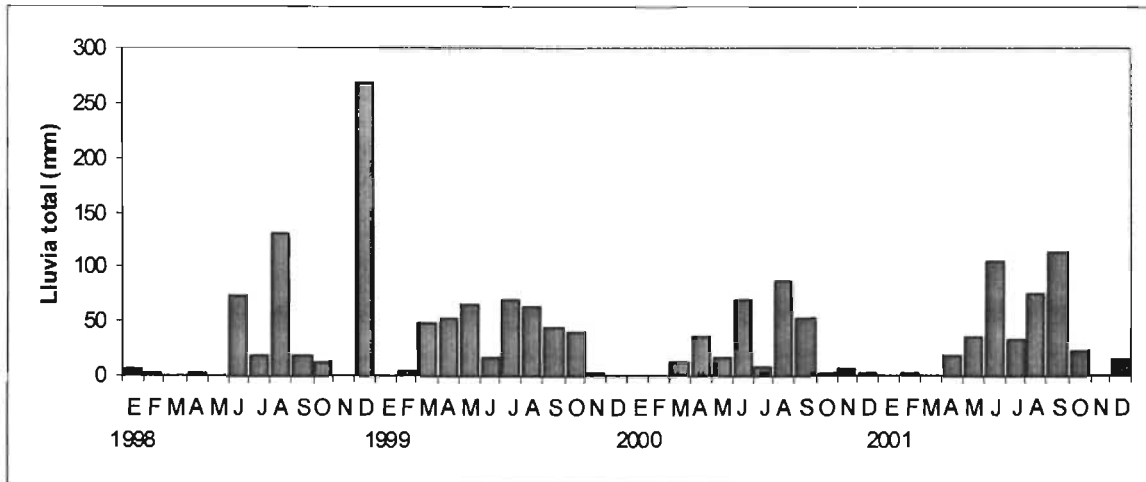


Fig. 21. Precipitación total acumulada (mm) mensualmente durante el periodo de muestreo 1998-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

Con relación a la presencia de tormentas (lluvias > 10 mm (SMN)) en este mismo periodo, se puede mencionar que se presentaron con mayor frecuencia (mayor número de días con tormenta) durante la época de lluvias (Fig. 22). También es importante hacer notar que en los últimos diez años, a partir de 1989, el número de tormentas presentadas anualmente ha aumentado de forma significativa ($R^2= 0.314$; $F(1,32)=16.09$; $p<0.01$) (Fig. 23).

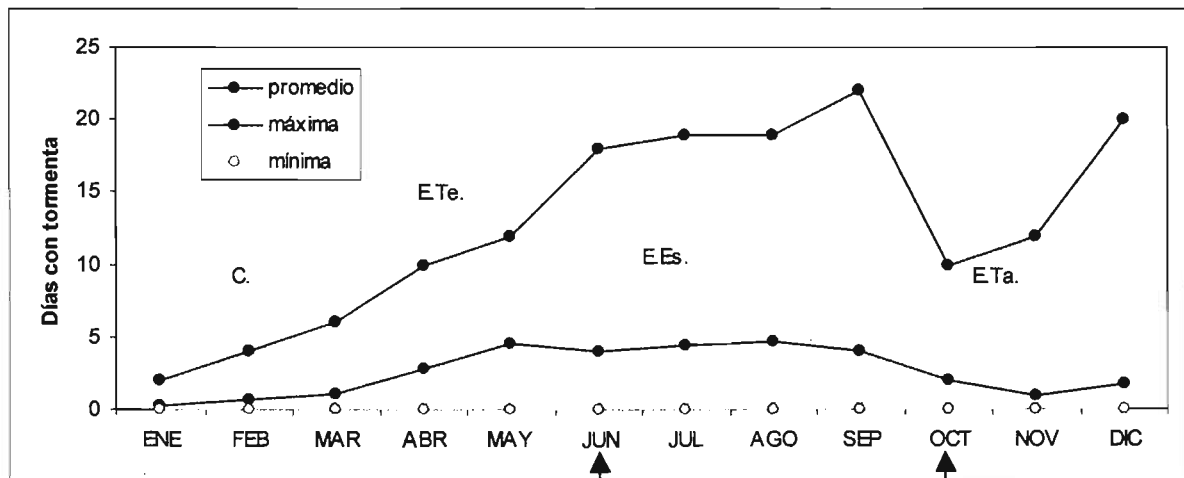


Fig. 22. Número promedio de días con tormenta por mes del periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional). (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). Se señala con flechas el inicio y fin aproximado de la época de lluvias.

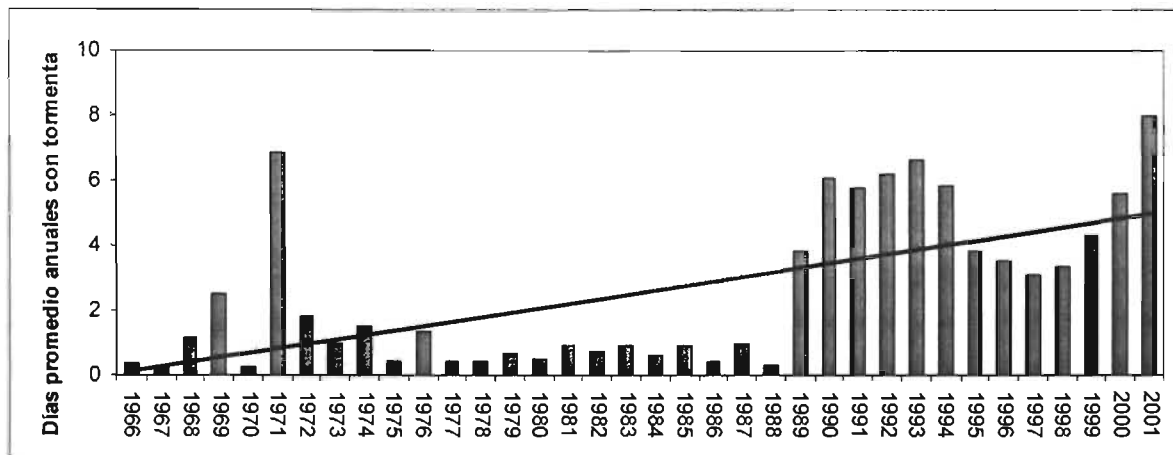


Fig. 23. Número de días con tormenta en el periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional). $R^2= 0.314$; $F(1,32)= 16.09$; $p<0.01$.

1.2.1.3 NIEBLA

El análisis de los días con niebla es importante ya que puede ser un factor limitante de la cantidad de luz disponible para el fitoplancton del lago. De este fenómeno se puede mencionar que se presenta con mayor frecuencia durante el periodo de estratificación tardía y circulación del lago (en total, de octubre a febrero, aproximadamente), y con menor frecuencia durante la estratificación temprana (marzo a mayo, aproximadamente) (Fig. 24). Durante el periodo estratificación tardía y circulación la cantidad de luz que llega al lago podría estar afectada debido a este factor. Aunque hay que considerar que por lo general este fenómeno se presenta únicamente durante la noche y la mañana.

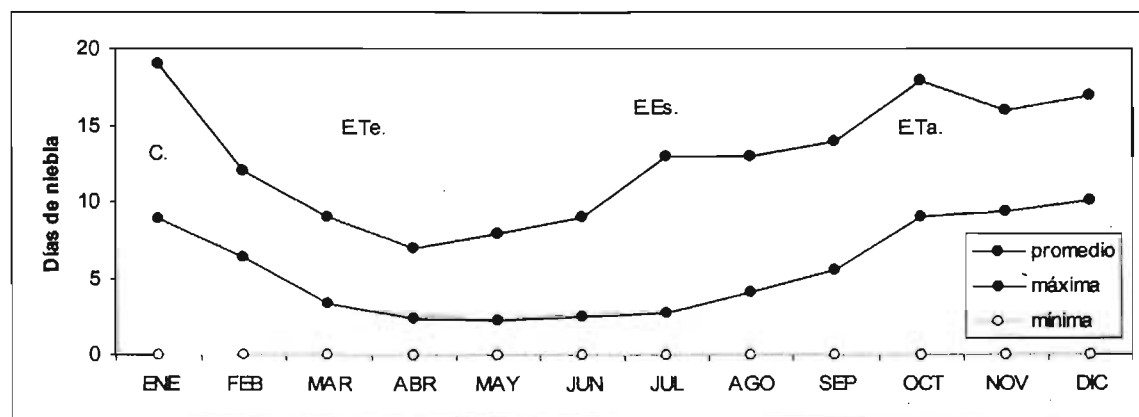


Fig. 24. Promedios mensuales de días con niebla durante el periodo 1966-2001 registrados en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional). (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

1.2.1.4 EVAPORACIÓN

Con relación a la cantidad de agua que se evapora en la región del lago Alchichica, se encontró que este valor es mayor al de precipitación con una evaporación anual promedio de $1696.77 \pm 115.25\text{mm}$ contra un valor de precipitación anual acumulada promedio de $435.55 \pm 160.02\text{mm}$. Esto indica un déficit hídrico importante en la región, casi de cuatro veces más evaporación que precipitación.

La evaporación promedio mensual fue de $146.32 \pm 34.26\text{mm}$ con un máximo de 265.82mm durante la estratificación temprana (mayo) de 1998 y un mínimo de 91.1mm durante estratificación bien establecida (agosto) del 1984 (Fig. 25).

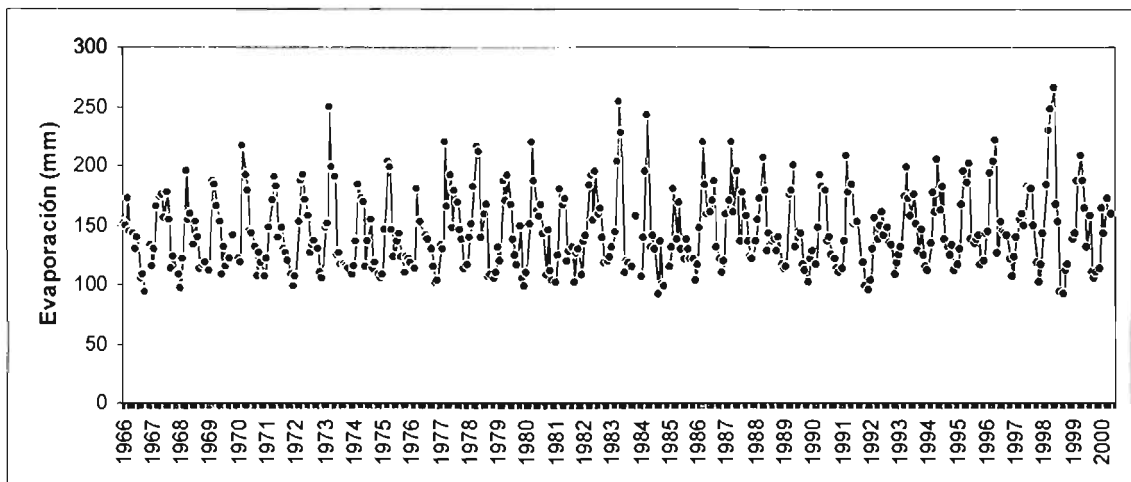


Fig. 25. Evaporación mensual (mm) durante el periodo 1966-2001 registrada en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional).

Por otra parte, es importante mencionar que la época con mayor evaporación del año es la correspondiente a la estratificación temprana del lago y la época con menor evaporación es la correspondiente a la circulación y estratificación bien establecida (Fig. 26). Fenómeno relacionado con los valores máximos y mínimos de temperatura del aire (Fig. 17,18).

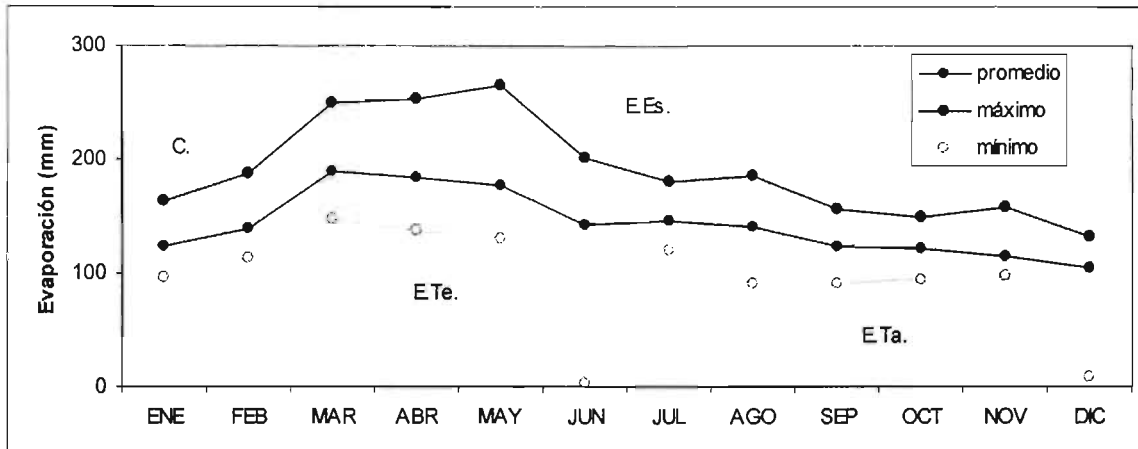


Fig. 26. Promedio mensual de la evaporación (mm) mensual durante el periodo 1966-2001 registrado en la estación "Laguna de Alchichica" (Servicio Meteorológico Nacional). (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

1.2.2 MARCO CLIMÁTICO LOCAL

Las condiciones climáticas específicas del lago Alchichica que fueron registradas *in situ* durante el periodo comprendido entre diciembre de 2002 a enero de 2004 se presentan a continuación en los siguientes parámetros: energía solar, precipitación, evapotranspiración, humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento.

1.2.2.1 ENERGÍA SOLAR

Los valores de energía solar registrados en el lago Alchichica presentaron un valor promedio de $(20.74 \pm 28.84 \text{ W/m}^2/\text{s})$ con un máximo de $102.4 \text{ W/m}^2/\text{s}$ en estratificación bien establecida del año 2003 (agosto, verano). En el año registrado (diciembre 2002-enero 2004), se presentaron los valores promedio máximos durante la estratificación temprana del lago (primavera) y mínimos durante el periodo de circulación (invierno) (Fig. 27).

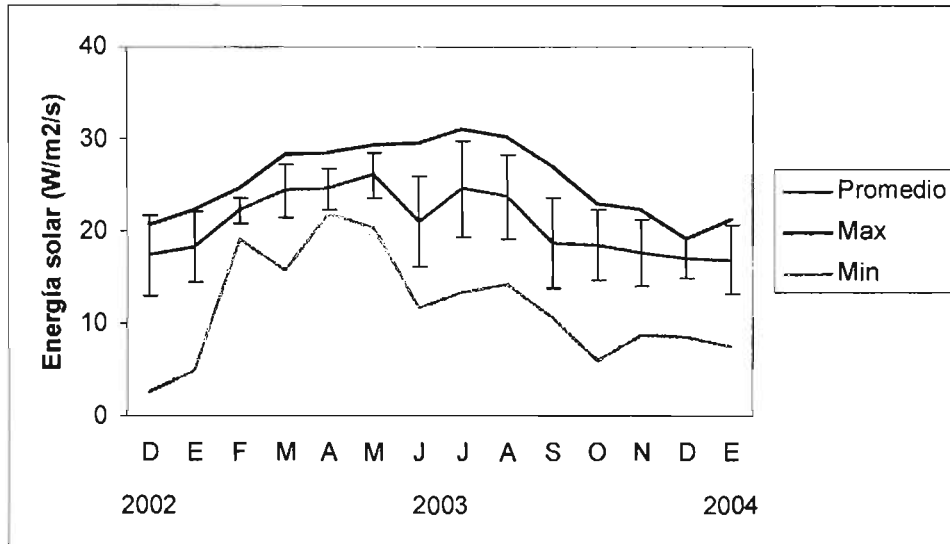


Fig. 27. Energía solar ($W/m^2/s$) promedio mensual y desviación estándar registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.

Los valores medidos mostraron una curva con un aumento de la energía solar desde la primavera hasta el verano para después declinar en el otoño, presentando una ligera baja durante la época de lluvias. Se observó una variación menor en la primavera o estratificación temprana (desviación estándar promedio de $27.91 W/m^2/s$) y una variación mayor de la energía solar en el verano o periodo de estratificación bien establecida lo cual esta probablemente asociado a la nubosidad de la época (desviación estándar promedio de $56.16 W/m^2/s$).

1.2.2.2 PRECIPITACIÓN

La cantidad de lluvia (mm) que cayó en el Lago Alchichica durante 2003 fue más alta que el promedio contemplado con 599.32mm. Por otra parte, se presentó un valor promedio diario anual de $0.03 \pm 0.3mm$; un valor máximo de 8.13mm durante lo que sería la estratificación bien establecida del lago (27 de septiembre, a las 1:00 h) y un mínimo de 0mm durante la época de secas.

Como puede observarse en la Fig. 28 la época de lluvias comenzó en el mes de mayo (finales de estratificación temprana), aunque se presentaron algunas lluvias tempranas en marzo (contribuyendo con un 3.66% al total anual) y finalizó en noviembre (estratificación tardía).

De la misma forma que en el caso de la temperatura, la lluvia medida *in situ* en el Lago Alchichica fue similar a aquellas obtenidas de la región (Sección 1.2.1.2).

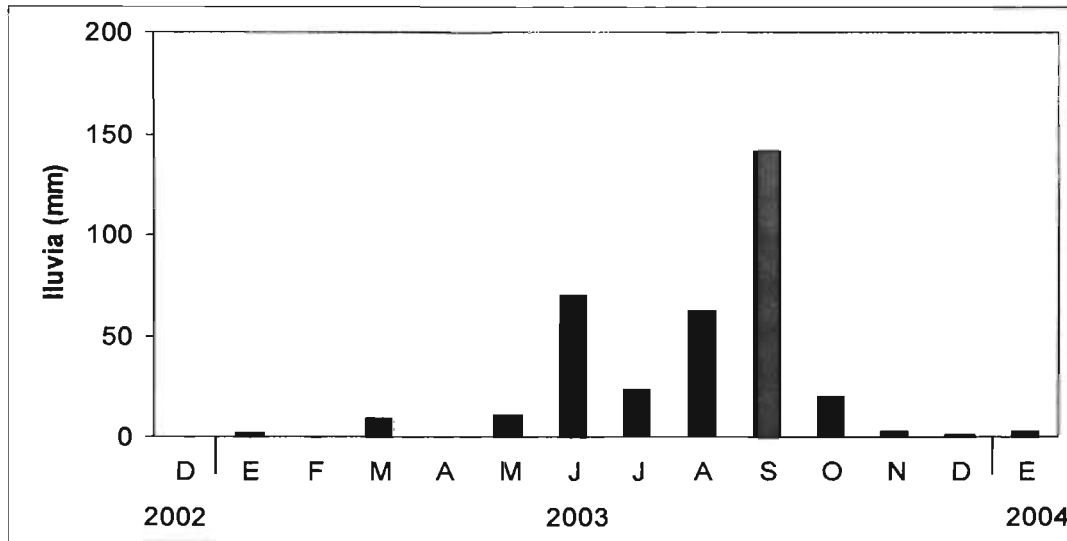


Fig. 28. Precipitación (mm) total mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.

1.2.2.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Con relación a la evapotranspiración, al igual que en el análisis regional, se presentaron valores mayores a los de la precipitación. La evapotranspiración anual fue de 1398.36mm contra 599.32mm de precipitación. Se presentó un valor máximo de 0.97mm durante la estratificación temprana del lago (marzo 19, 14:00 h) y un valor mínimo de -0.05 mm durante la estratificación tardía (octubre 11, 5:00 h) Los promedios máximos se presentaron durante la estratificación temprana del lago y los mínimos durante la circulación y la estratificación tardía (Fig. 29).

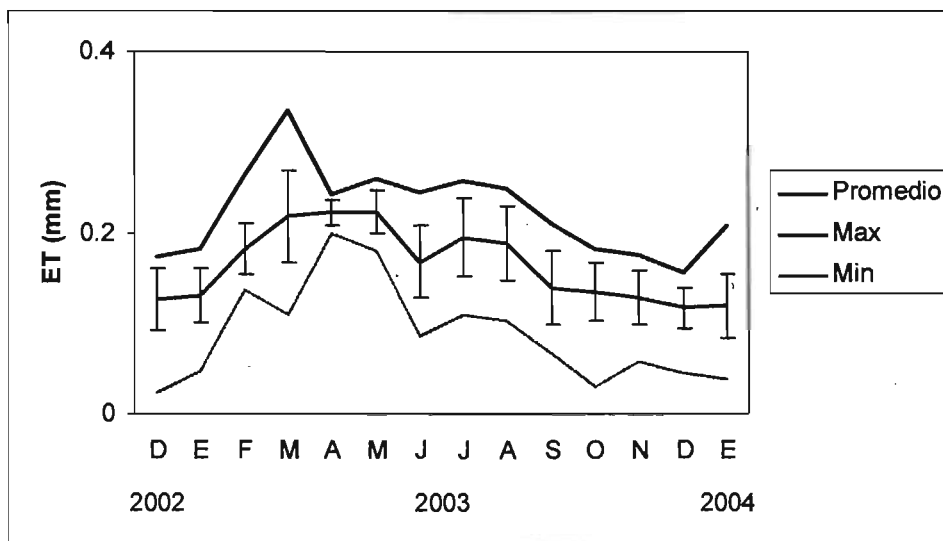


Fig. 29. Evapotranspiración (ET) (mm) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.

1.2.2.4 HUMEDAD

La humedad relativa en el ambiente (Fig. 30) presentó un patrón similar al de la lluvia (Fig. 30) con valores promedio de $64.24 \pm 10.14\%$ (máximo valor de 96% durante la estratificación bien establecida del lago y un mínimo de 5% durante la estratificación temprana).

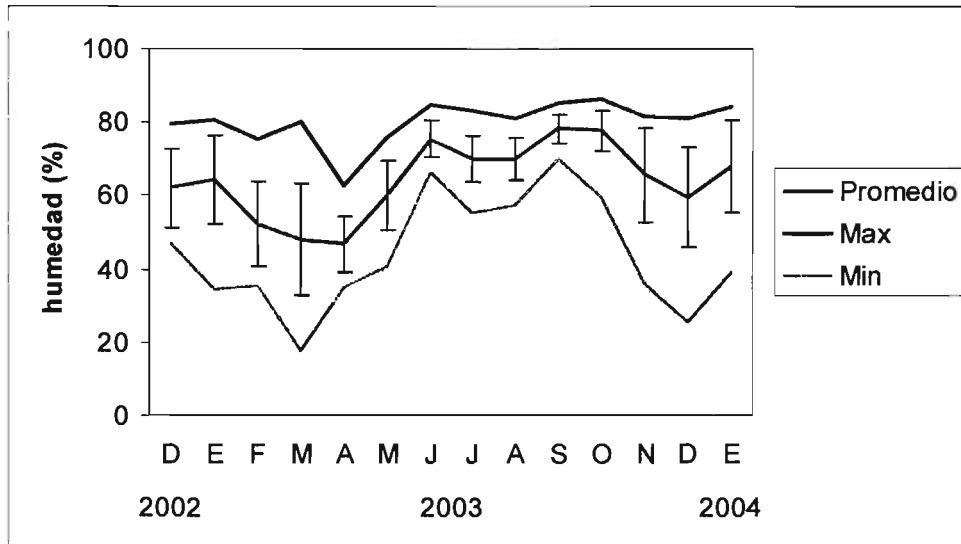


Fig. 30. Humedad (%) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.

1.2.2.5 TEMPERATURA DEL AIRE

La temperatura del aire en el Lago Alchichica mostró un promedio de $12.85 \pm 5.81^\circ\text{C}$, con un amplio rango de valores que van desde los -8.6°C (15 de diciembre 2003, 7:00 h) hasta los 28.8°C (3 de mayo, 16:00 h). Los valores de temperatura del aire promedio mostraron un patrón similar al observado en escala regional; un valor mínimo durante la época de circulación del lago (promedio $10.39 \pm 1.73^\circ\text{C}$), un aumento en la estratificación temprana (promedio $15.55 \pm 1.71^\circ\text{C}$) seguido de una disminución durante la estratificación bien establecida (promedio de $15.08 \pm 0.62^\circ\text{C}$), para finalizar con un ligero aumento al inicio de la estratificación tardía, para luego disminuir al acercarse la circulación ($13.40 \pm 1.78^\circ\text{C}$) (Fig. 31).

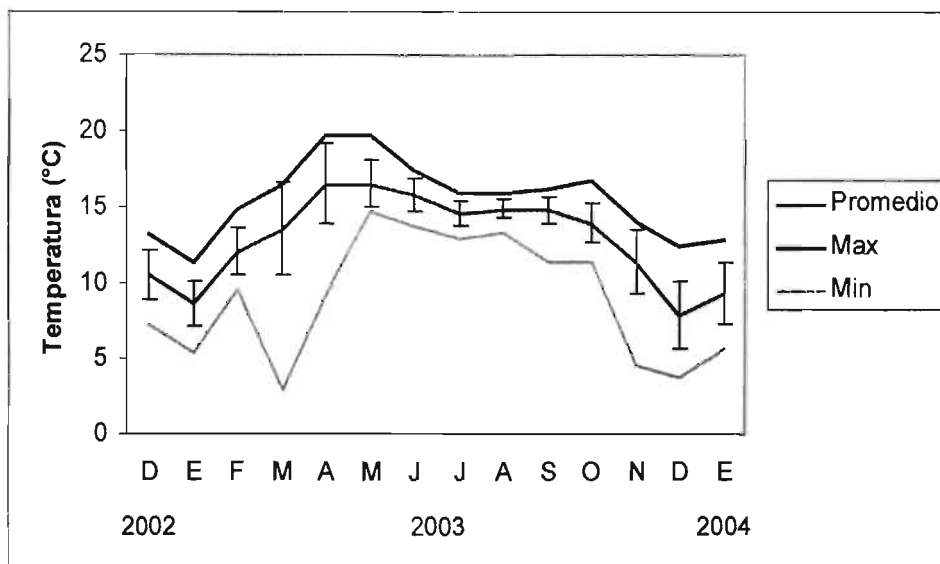


Fig. 31. Temperatura del aire (°C) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.

Este patrón fue consistente con el encontrado en la información regional de 1966-2002, por lo que las conclusiones obtenidas a partir de esta información son válidas en ciertas escalas y aspectos para el lago Alchichica.

1.2.2.6 VIENTO

Los valores de velocidad de viento registrados en el Lago Alchichica tuvieron un promedio de $2.32 \pm 1.69\text{m/s}$, con un máximo de 10.7m/s (febrero 21, 16:00 h). En el ciclo anual, se presentaron valores promedio mensuales similares en todos los periodos del año; $5.64 \pm 3.43\text{m/s}$ en circulación y $5.15 \pm 2.87\text{m/s}$, $5.12 \pm 2.54\text{ m/s}$ y $5.22 \pm 2.85\text{m/s}$, durante la estratificación temprana, bien establecida y tardía respectivamente (Fig. 32). Por otra parte, tanto los valores sin promediar (Fig. 33) como la distancia recorrida por el viento (Km.) presentaron valores máximos durante la circulación ($9.12 \pm 6.92\text{km}$) seguidos de la estratificación tardía ($8.48 \pm 5.74\text{km}$), temprana y bien establecida ($7.67 \pm 5.12\text{km}$ y $7.46 \pm 4.48\text{km}$ respectivamente). Estas diferencias fueron significativas, mostrando como periodo diferente a la circulación en cuanto a la velocidad del viento ($F(3,8428) F= 13.2$; $p<0.01$) y a la circulación y estratificación tardía en cuanto a la distancia recorrida por el viento ($F(3,8428) F= 30.19$ $p<0.01$).

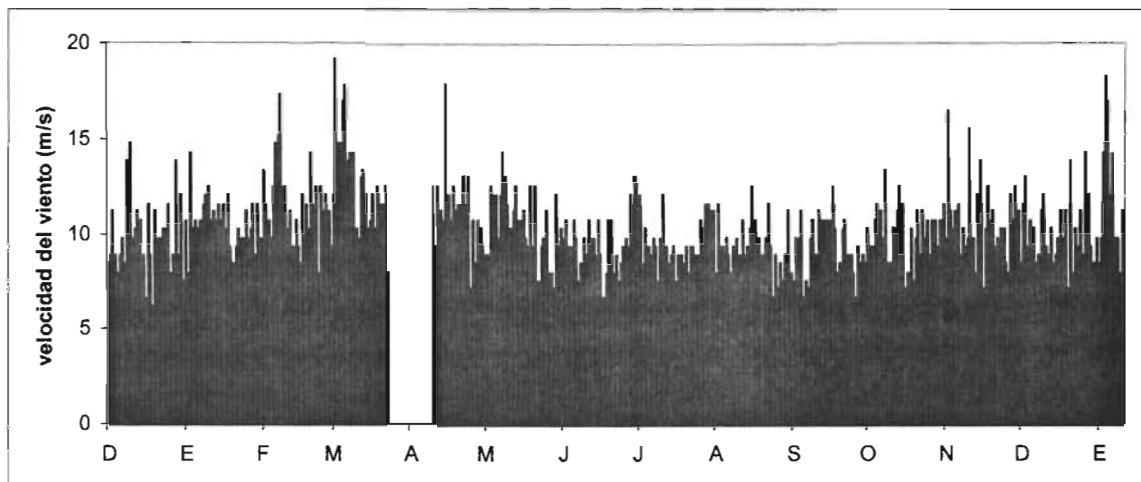


Fig. 32. Velocidad del viento (m/s) registrada (cada hora) durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica. (No se registraron datos del 6 al 22 de abril, 2003).

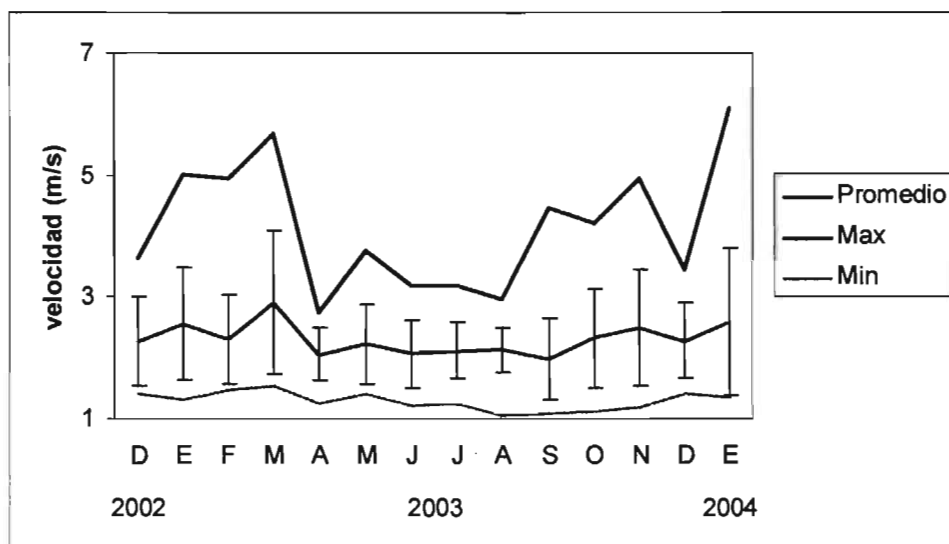


Fig. 33. Velocidad del viento (m/s) promedio mensual registrada durante el periodo diciembre de 2002 a enero de 2004 para el lago Alchichica.

2. PARÁMETROS BIOLÓGICOS

El análisis del comportamiento de la biomasa fotosintética planctónica expresada como clorofila "a" -total y fraccionada- se realizó siguiendo la división vertical (i.e. epi - Z_{MIX} -, meta e hipolimnion) y temporal (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía) correspondiente a la hidrodinámica característica del lago descrita por Alcocer *et al.* (2001) y Adame (2004) debido a las implicaciones biológicas que conlleva en la generación de biomasa fitoplanctónica y en la sucesión de tallas de fitoplancton.

2.1 BIOMASA FITOPLANCTONICA

2.1.1 BIOMASA FITOPLANCTÓNICA TOTAL

Los valores de clorofila "a" total variaron entre $0.12\mu\text{g/L}$ (hipolimnion, durante el periodo de estratificación bien establecida, 2001) y $18.59\mu\text{g/L}$ (epilimnion, durante el periodo de circulación, 2000), con un valor promedio de $4.18 \pm 4.3 \mu\text{g/L}$.

La biomasa fitoplanctónica total expresada como clorofila "a" mostró variaciones tanto en el tiempo como en el perfil vertical. En el primer caso, mostró variaciones significativas por año ($F = 4.72$; $p < 0.05$) (Fig. 34) siendo los años 2000 y 2002 similares (similitud=0.94) y diferentes a los años 1999 y 2001 (similitud=0.92); finalmente el año con mayor diferencia fue el 1998 (similitud=0.01). De ellos, el año con mayor aportación fue el 2000 seguido del 2002 (Fig. 34). Hay que recordar que durante el año 1998, no se tuvieron valores de los dos primeros meses de circulación (enero y febrero) por lo que los promedios y valores anuales y de la circulación están subestimados.

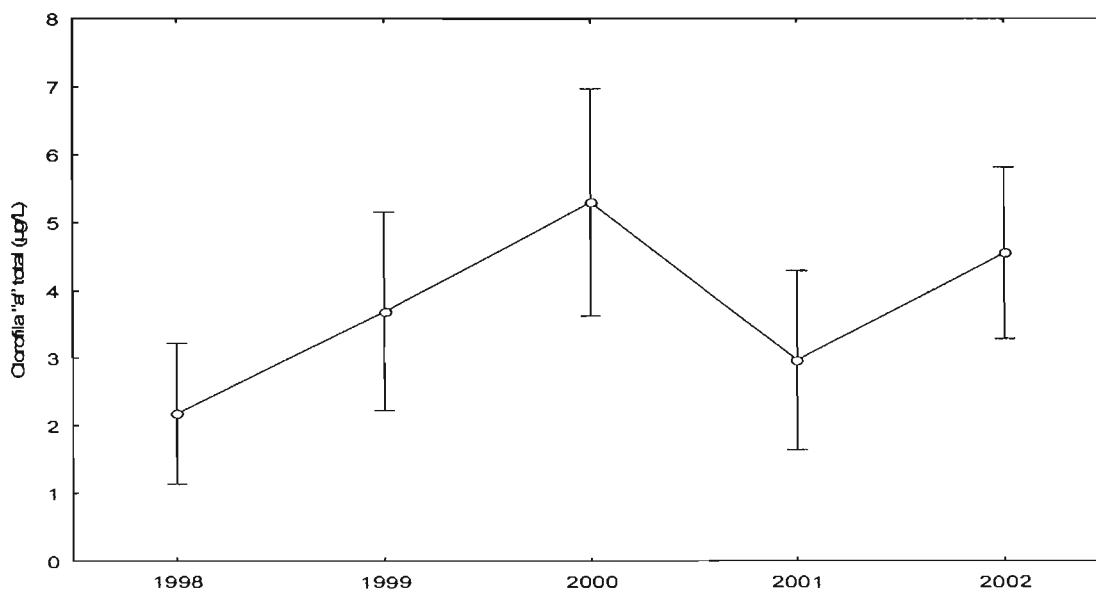


Fig. 34. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total en los años muestreados. $F(4,148) = 4.72$; $p < 0.05$. (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

El periodo de mayor aportación de biomasa fitoplanctónica al lago fue el de circulación, seguido de la estratificación tardía, temprana y finalmente la bien establecida (Tabla 10). Nuevamente estas diferencias fueron significativas ($F=12.38$; $p<0.01$), así como las diferencias entre años/periodo ($F=4.03$; $p<0.01$) (Fig. 35, Tabla 10).

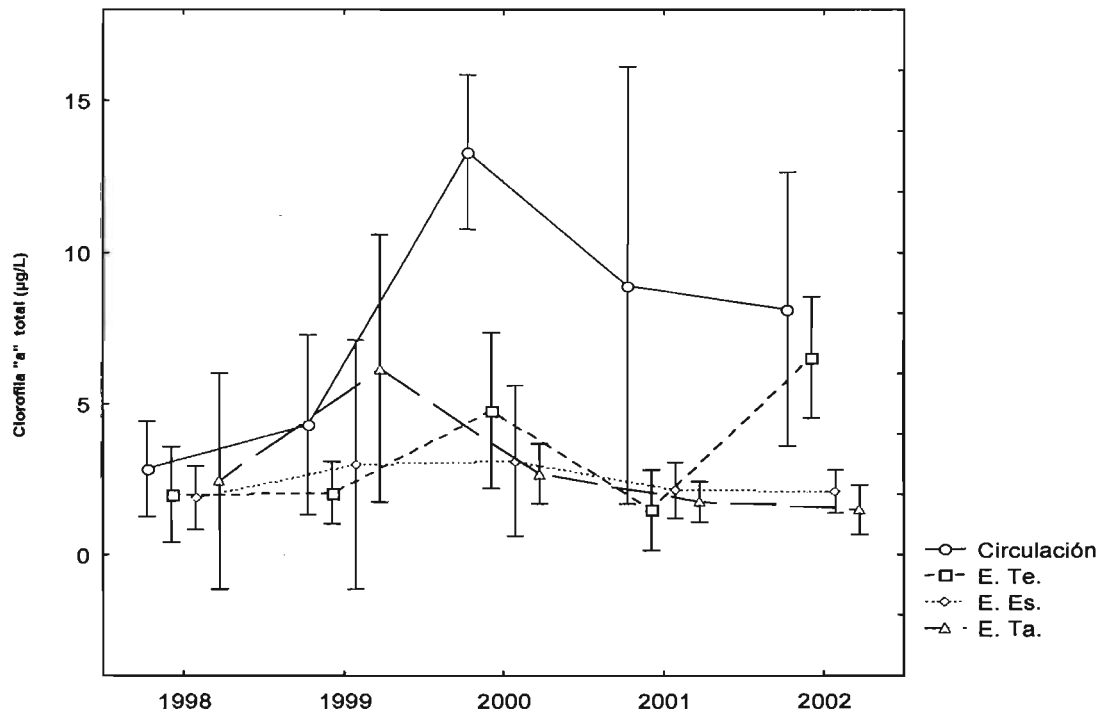


Fig. 35. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total entre los años muestreados y los periodos del lago (E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

Tabla 10. Biomasa fitoplanctónica total expresada como clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$) promediada de 5 años (1998-2002) y promedios máximos y mínimos. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.=estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

	C.	año	E.Te	año	E.Es.	año	E.Ta	año
promedio	7.17		2.83		2.20		2.88	
d.e.	3.84		1.68		0.45		1.59	
N	90		142		120		100	
max.	11.34	2000	5.78	2002	2.72	2000	5.59	1999
min.	2.75	1998	1.70	2001	1.53	1998	1.68	2002

Con relación a la distribución espacial de la biomasa fitoplanctónica expresada como clorofila "a", se encontraron diferencias significativas ($F=4.3$ $p<0.05$) en la distribución en la vertical de la clorofila "a" total, la cual se concentró

en el metalimnion (Fig. 36,37) durante la estratificación del lago. En contraparte, durante el periodo de circulación, la clorofila "a" presentó una distribución homogénea en toda la columna de agua. Sin embargo, esta homogeneidad presentó variaciones entre los años muestreados, los años con mayor uniformidad en la columna de agua fueron 2000 y 2002 con 22.6 y 24.2% versus 33.1, 34.0 y 32.7% en 1998, 1999 y 2001, respectivamente.

Fig. 36. Comparación de promedio de la concentración de clorofila "a" total entre los años muestreados y los estratos del lago. $F(8,108) = 0.67$; $p = n.s.$ (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

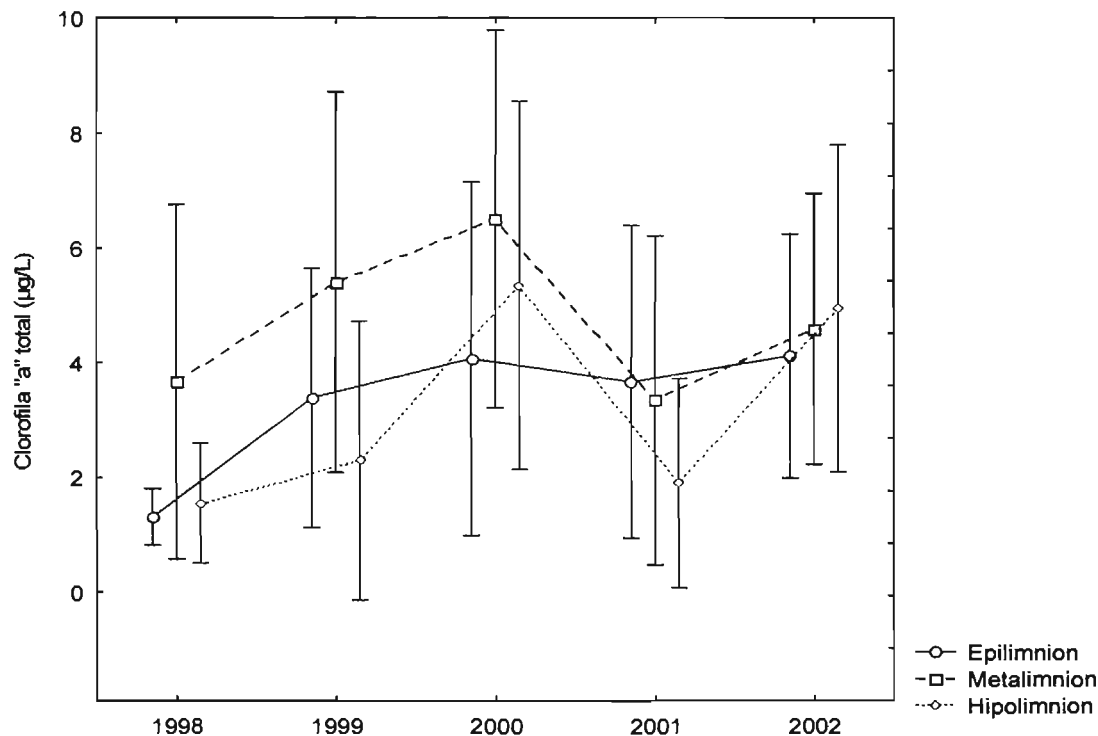


Fig. 36. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total entre los años y estratos del lago. $F(8,108) = 0.67$; $p = n.s.$ (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

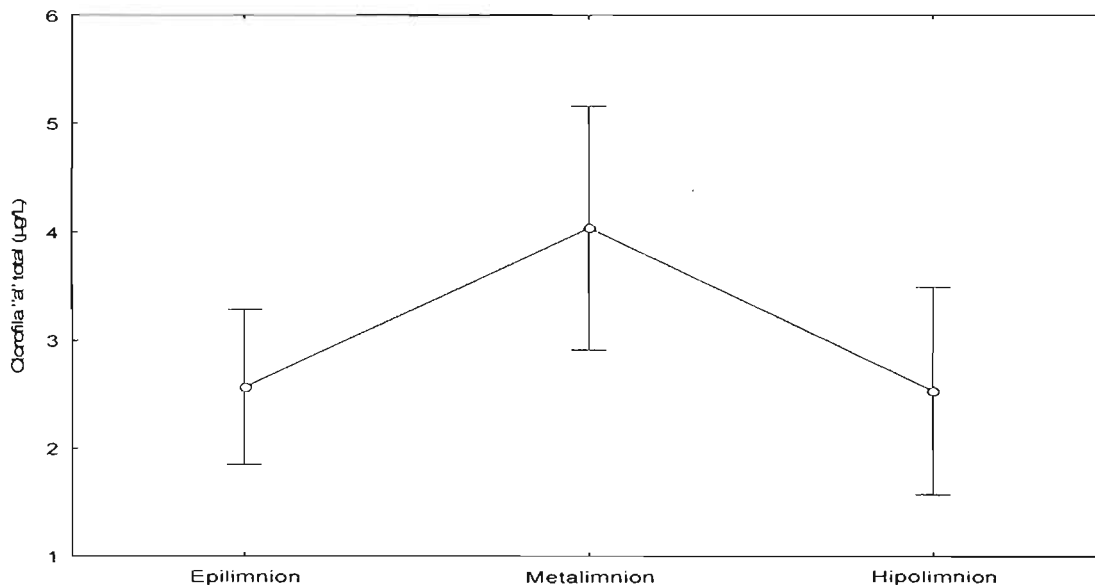
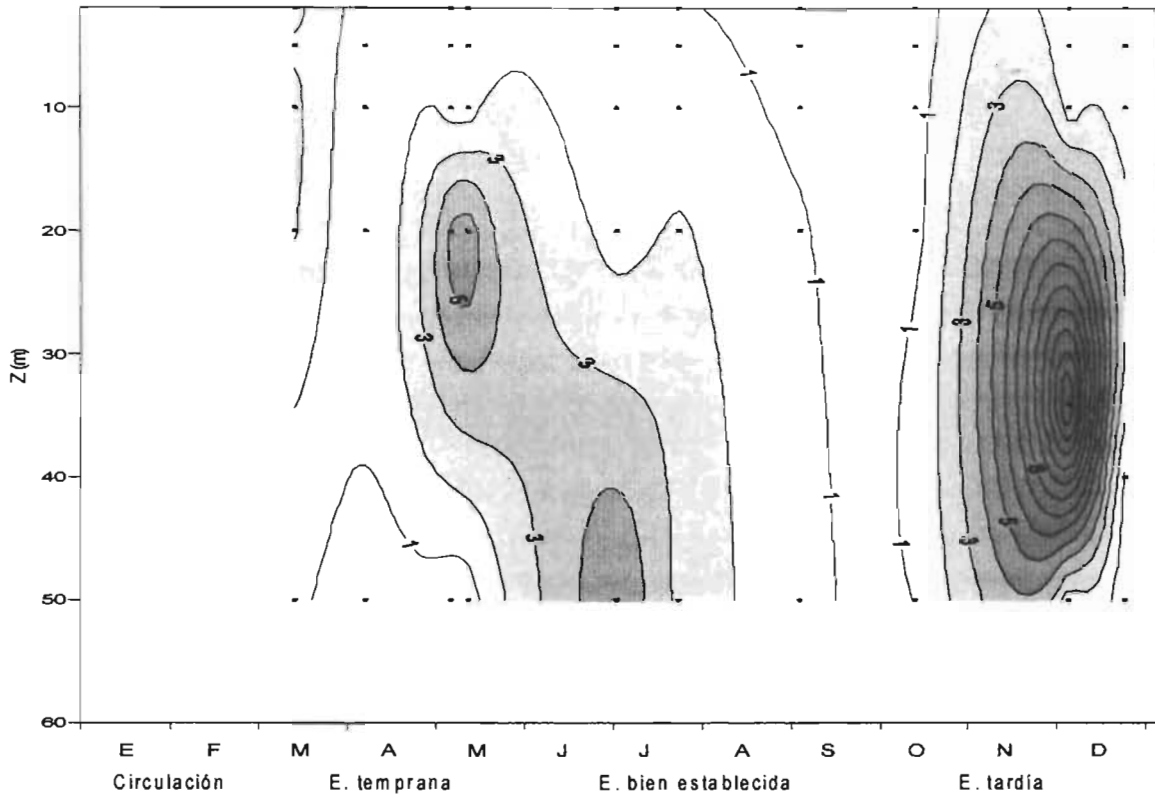


Fig. 37. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" total entre los estratos del lago. $F(2,99) = 4.2716$; $p = 0.01662$. Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95.

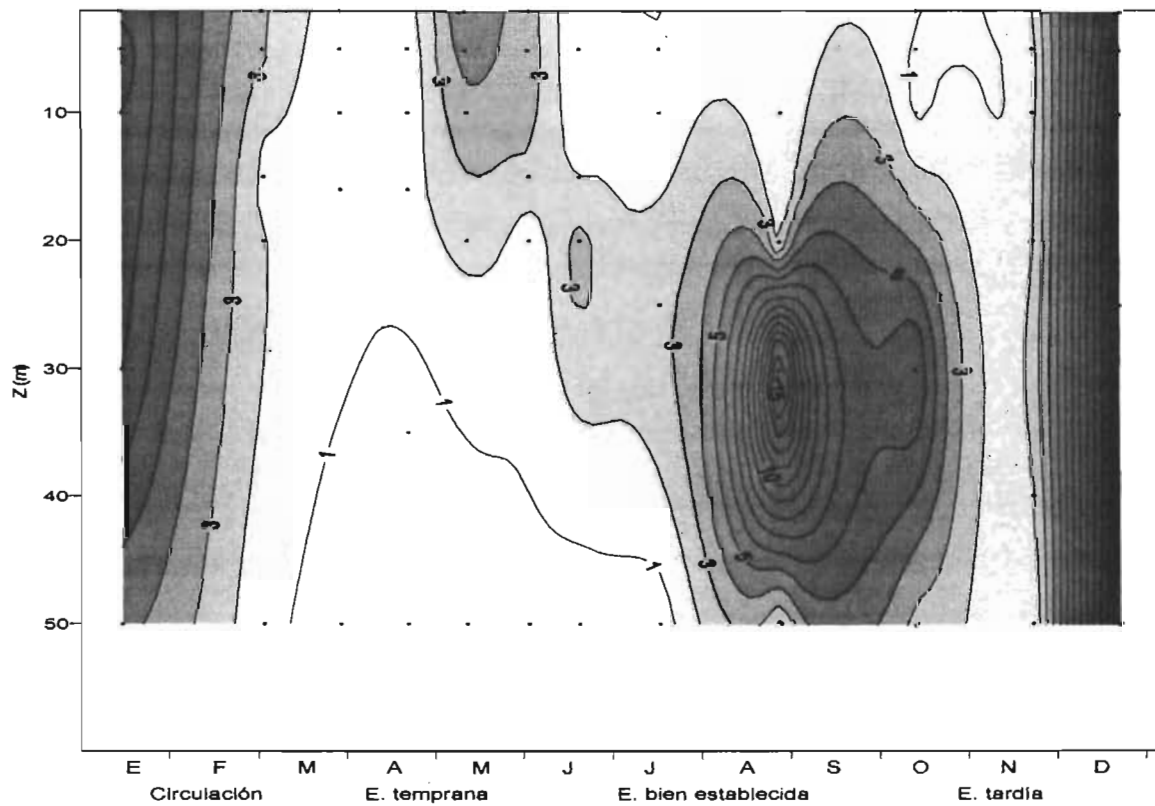
En una visión general, se pudo observar un comportamiento anual. Durante la circulación la clorofila "a" muestra una distribución más o menos homogénea y con elevada concentración; por otra parte, durante la estratificación, las concentraciones disminuyen y se distribuyen de forma diferencial en las tres capas del lago (epi-,meta- e hipolimnion) (Tabla 11). De forma más específica, se pudo observar que durante los tres periodos en los que se ha dividido la estratificación (temprana, bien establecida y tardía) las concentraciones de clorofila "a" mostraron una distribución en la columna de agua diferente. Durante la estratificación bien establecida, fue clara la formación de un DCM en la base del metalimnion donde se concentró la mayor parte de la clorofila "a". Sin embargo, durante la estratificación temprana y tardía, la distribución del fitoplancton presentó mayor variación, aunque generalmente se presentaron las mayores concentraciones en el epi- y metalimnion. Además, durante los periodos de estratificación temprana del año 2000 y 2002 se presentaron los valores máximos de clorofila "a" en el hipolimnion (Tabla 11, Fig. 38).

Tabla 11. Biomasa fitoplanctónica total expresada como clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$) promediada por año, por estrato (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo (C.= circulación; E.Te= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). *La circulación del año 1998 esta subestimada debido a falta de datos de los dos primeros meses del periodo.

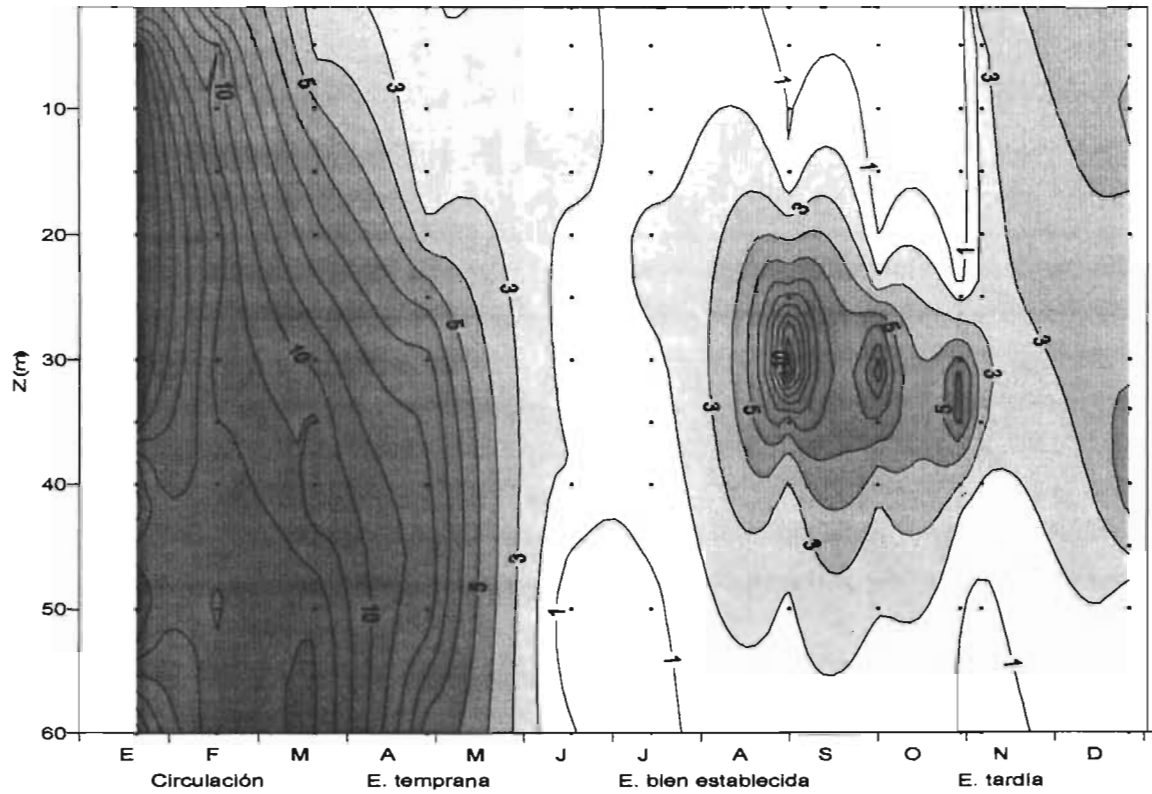
	C.	capa	E.Te	E.Es.	E.Ta
1998	2.75 \pm 0.91*	Epi-	1.29 \pm 0.13	0.99 \pm 0.31	1.05 \pm 0.41
		Meta-	4.12 \pm 2.52	1.62 \pm 0.55	5.38 \pm 8.16
		Hipo-	0.56 \pm 0.14	3.03 \pm 1.95	0.86 \pm 0.41
		N	15	15	15
1999	3.59 \pm 3.18	Epi-	3.16 \pm 1.71	1.12 \pm 0.05	4.97 \pm 6.42
		Meta-	3.34 \pm 1.42	7.04 \pm 8.83	7.68 \pm 6.06
		Hipo-	0.48 \pm 0.16	0.80 \pm 0.67	5.88 \pm 7.00
		N	15	15	15
2000	11.34 \pm 3.01	Epi-	1.98 \pm 0.64	0.68 \pm 0.19	3.45 \pm 1.16
		Meta-	2.78 \pm 1.48	6.54 \pm 3.88	3.48 \pm 1.67
		Hipo-	3.29 \pm 3.61	2.86 \pm 0.17	1.80 \pm 0.17
		N	32	30	20
2001	8.12 \pm 6.77	Epi-	2.43 \pm 1.71	1.46 \pm 0.38	2.68 \pm 0.94
		Meta-	1.28 \pm 0.46	2.99 \pm 0.15	1.85 \pm 0.70
		Hipo-	0.41 \pm 0.11	1.73 \pm 0.73	0.48 \pm 0.28
		N	40	30	30
2002	10.06 \pm 1.71	Epi-	4.21 \pm 2.65	2.31 \pm 0.93	1.82 \pm 0.62
		Meta-	4.20 \pm 0.98	2.84 \pm 0.31	1.86 \pm 0.91
		Hipo-	7.12 \pm 2.59	1.14 \pm 0.43	0.76 \pm 0.50
		N	40	30	20



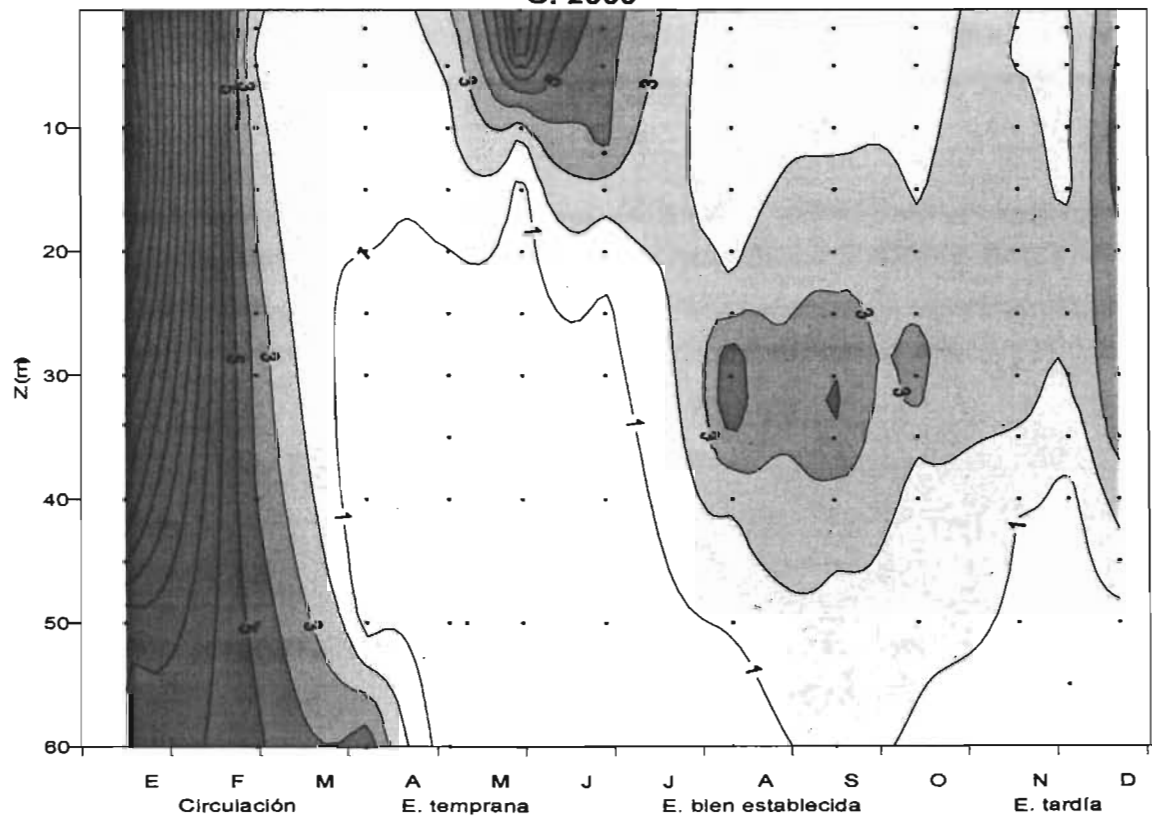
A. 1998



B. 1999



C. 2000



D. 2001

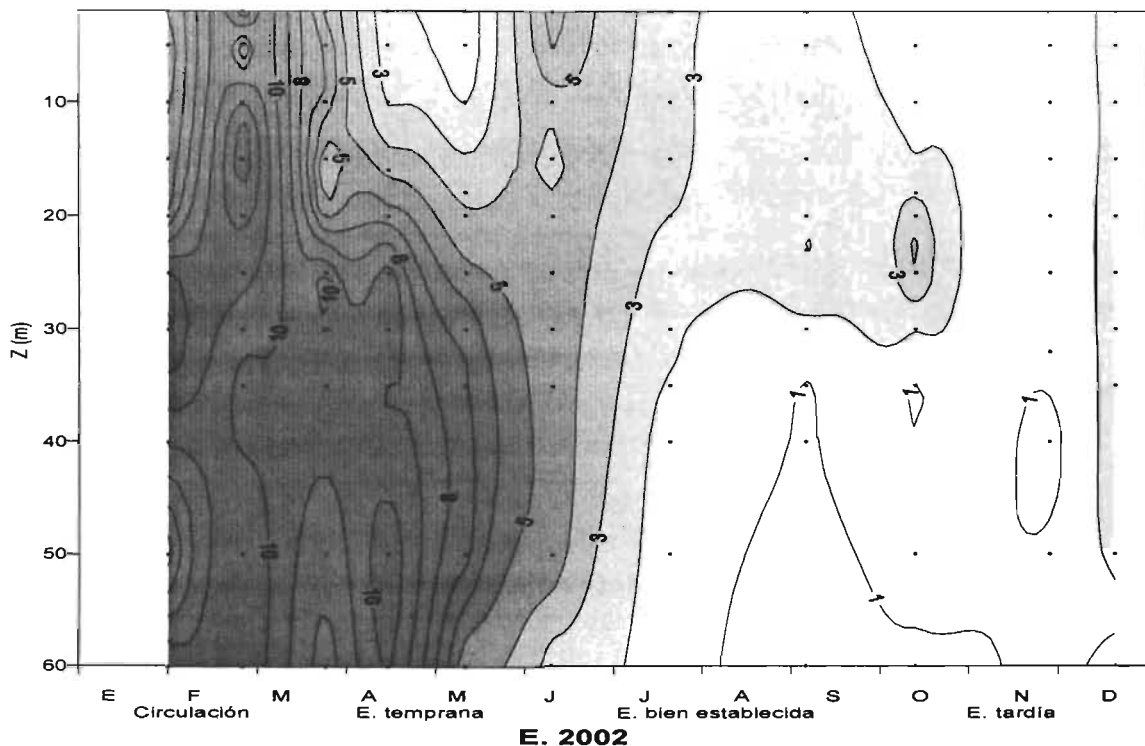


Fig. 38. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de concentraciones de clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$) total durante los años: A) 1998; B) 1999; C) 2000; D) 2001; E) 2002. Se señalan con marcadores (·) los puntos e intensidad de muestreo.

La concentración de clorofila "a" integrada verticalmente presentó un valor promedio en los cinco años de $207.79 \pm 204.1 \text{mg/m}^2$, con un valor máximo durante la circulación del 2000 de 852.21mg/m^2 y un mínimo de 37.39mg/m^2 durante la estratificación tardía de 1998 (Tabla 12). Existió una variación importante en los valores de clorofila "a" integrada entre periodos y años (Fig. 39). Los años con valores más altos fueron el 2000 y 2002 ($306.7 \pm 266 \text{mg/m}^2$ y $285.2 \pm 197.7 \text{mg/m}^2$, respectivamente) y los más bajos fueron 1998, 1999 y 2001 ($112.39 \pm 87.94 \text{mg/m}^2$, $173.19 \pm 172.39 \text{mg/m}^2$ y $160.32 \pm 211.22 \text{mg/m}^2$ respectivamente).

Del mismo modo, con relación a la variación intra-anual, los valores integrados en la columna de agua presentaron la misma tendencia que la clorofila "a" total. Se encontraron valores máximos durante la circulación, valores que van desde los 330.8mg/m^2 en 1999 hasta los 852mg/m^2 en el año 2000 (Tabla 12). Las concentraciones de clorofila "a" integrada en la columna de agua durante el periodo de circulación solieron ser, aunque no siempre fueron, los valores máximos del año. Durante la estratificación temprana las concentraciones de clorofila "a" integrada disminuyeron de forma notable como en 1998, 1999 y 2001, ó se mantuvieron altas ($> 300 \text{mg/m}^2$) como en 2000 y 2002. En la estratificación bien establecida, las concentraciones se mantuvieron bajas pudiendo presentar algunos picos en el mes de agosto como sucedió en el año 1999 y 2000. Finalmente, durante la estratificación tardía, los valores integrados de clorofila "a" disminuyeron presentando ligeros aumentos (1999, 2000 y 2001) (Fig. 38) al acercarse el siguiente periodo de circulación (Fig. 39).

Tabla 12. Clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m^2) del Lago Alchichica. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). *El año 1998 esta subestimado debido a falta de datos en el periodo de circulación.

	1998*	1999	2000	2001	2002					
promedio	112.39	173.19	306.67	160.32	285.17					
d.e.	87.94	172.39	265.95	211.22	197.66					
N	50	60	112	120	110					
max.	332.58	C.	633.15	C.	852.21	C.	820.42	C.	639.55	C.
min.	37.39	E. Ta.	41.19	E. Te.	81.05	E. Es.	39.93	E. Te.	69.64	E. Ta.

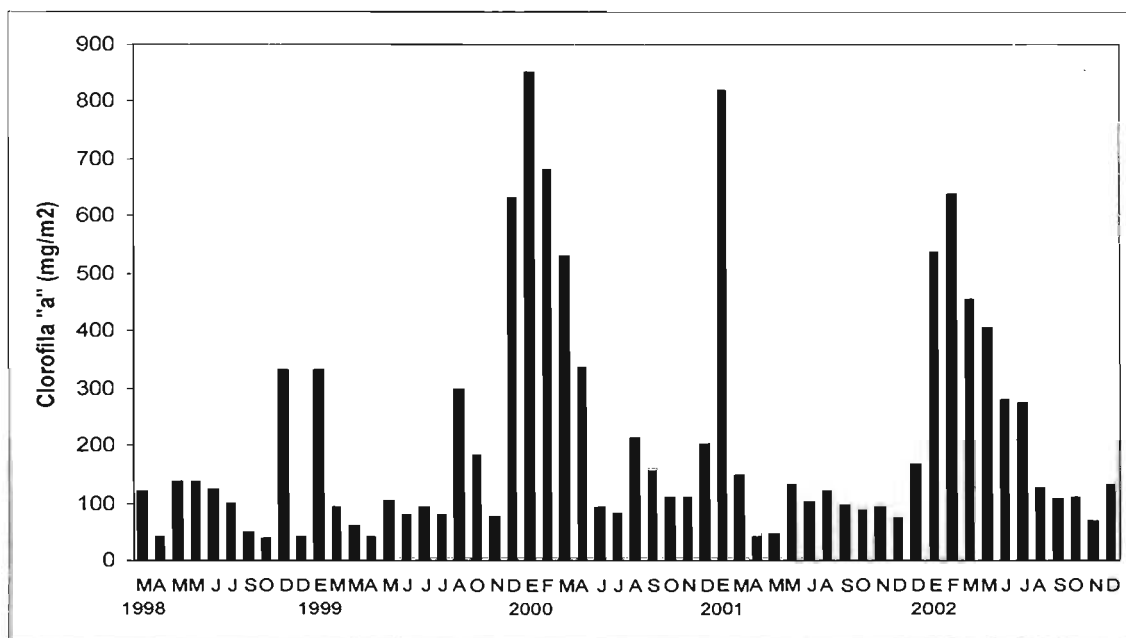


Fig. 39. Concentración de clorofila "a" total integrada en la columna de agua (mg/m^2) durante el periodo 1998-2002.

2.1.2 BIOMASA FITOPLANCTÓNICA FRACCIONADA

2.1.2.1 TALLA > 2 μm

La biomasa fitoplanctónica expresada como clorofila "a" de fitoplancton de talla mayor a 2 μm (*i.e.* nano y microfitoplancton) (Fig. 40) presentó valores entre 0.02 y 18.35 $\mu\text{g/L}$, con un valor promedio de $3.13 \pm 3.9\mu\text{g/L}$.

De la misma forma que la clorofila "a" total, su variación fue significativa entre año ($F=5.17$; $p<0.01$), periodo (circulación/estratificación) ($F=14.8$; $p<0.01$) y entre año/periodo ($F=4.34$; $p<0.01$). Sin embargo, su variación no fue significativa entre estrato durante todo el año ni durante la estratificación, aunque es evidente que su distribución es preferencialmente metalimnética. De igual forma, el fitoplancton >2 μm presentó valores máximos durante el 2000, seguido del 2002, así como la mayor aportación de biomasa en el periodo de circulación. La distribución temporal

y vertical fue casi idéntica a la de la clorofila "a" total (ver Figs. 36, 37, 38 y 39) lo cual implicó que la mayor parte de la biomasa fitoplanctónica total está compuesta por la talla > 2µm aunque al ser una fracción de la biomasa total, presentó, evidentemente, valores de concentración más bajos (en un 21.5%).

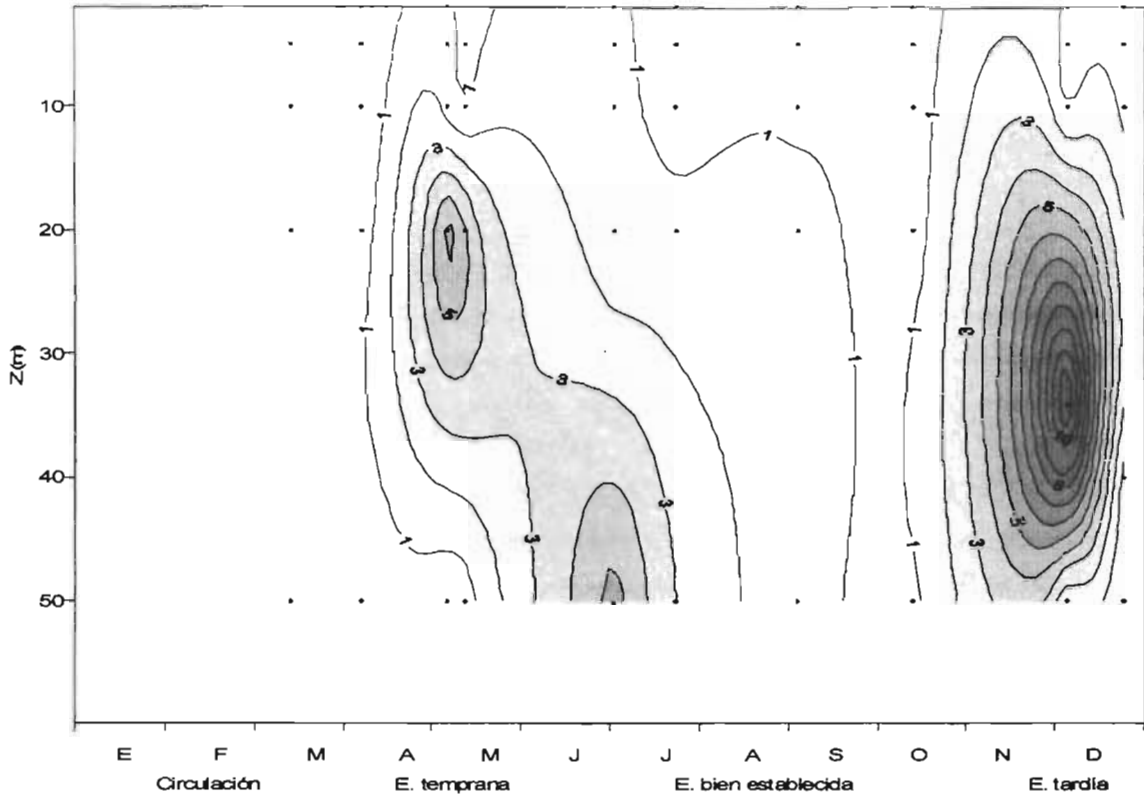
Los valores para cada año y periodo se presentan en las tablas 13 y 14.

Tabla 13. Biomasa fitoplanctónica > 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promedio de 5 años (1998-2002) y promedios máximos y mínimos. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.=estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

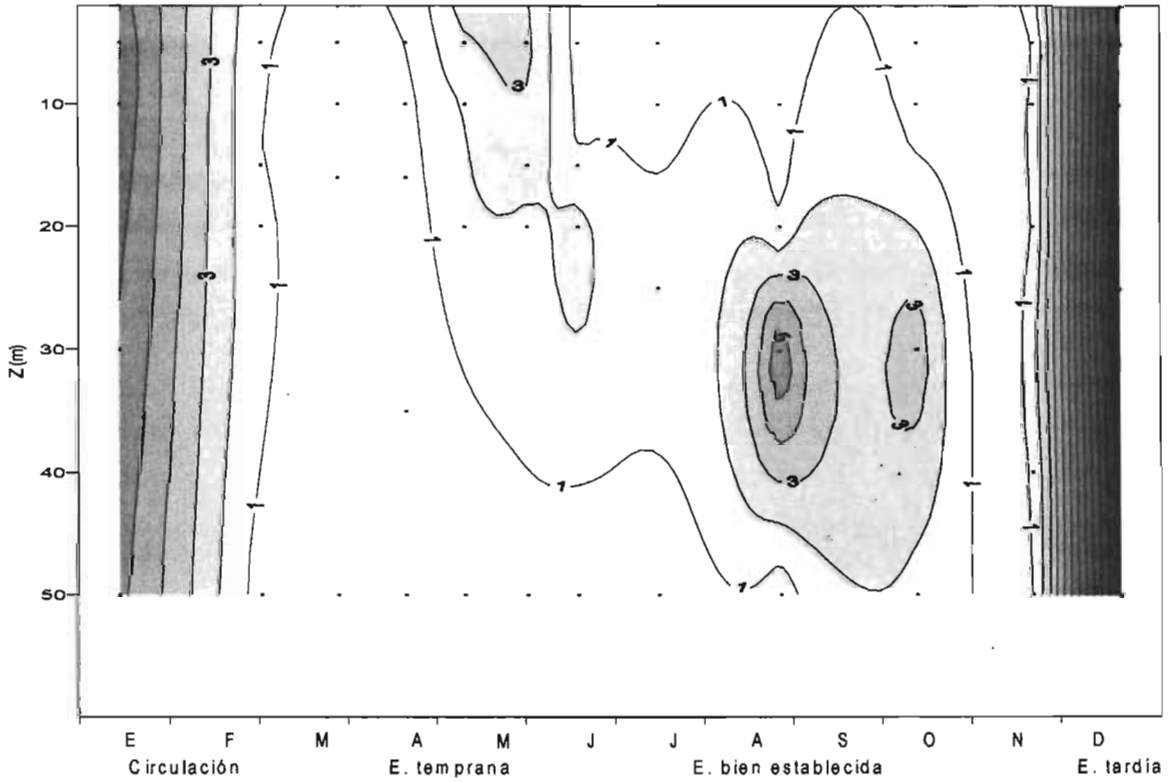
	C.	año	E.Te	año	E.Es.	año	E.Ta	año
promedio	5.97		2.31		1.54		2.14	
d.e.	4.09		1.31		0.35		1.66	
N	90		142		120		100	
max.	9.74	2000	4.58	2002	2.08	2000	5.04	1999
min.	0.64	1998	1.31	2001	1.18	1999	0.84	2002

Tabla 14. Biomasa fitoplanctónica > 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promedio por año, por estrato (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.=estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). *La circulación del año 1998 esta subestimada debido a falta de datos de los dos primeros meses del periodo.

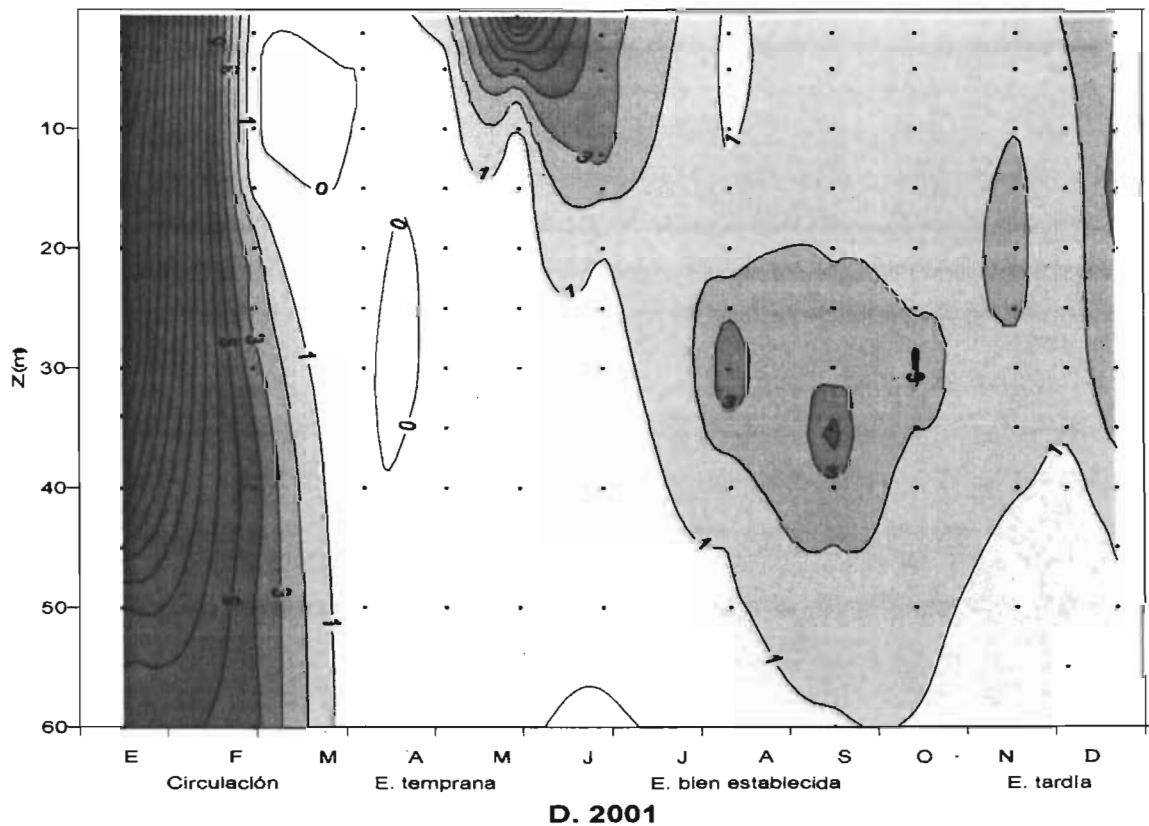
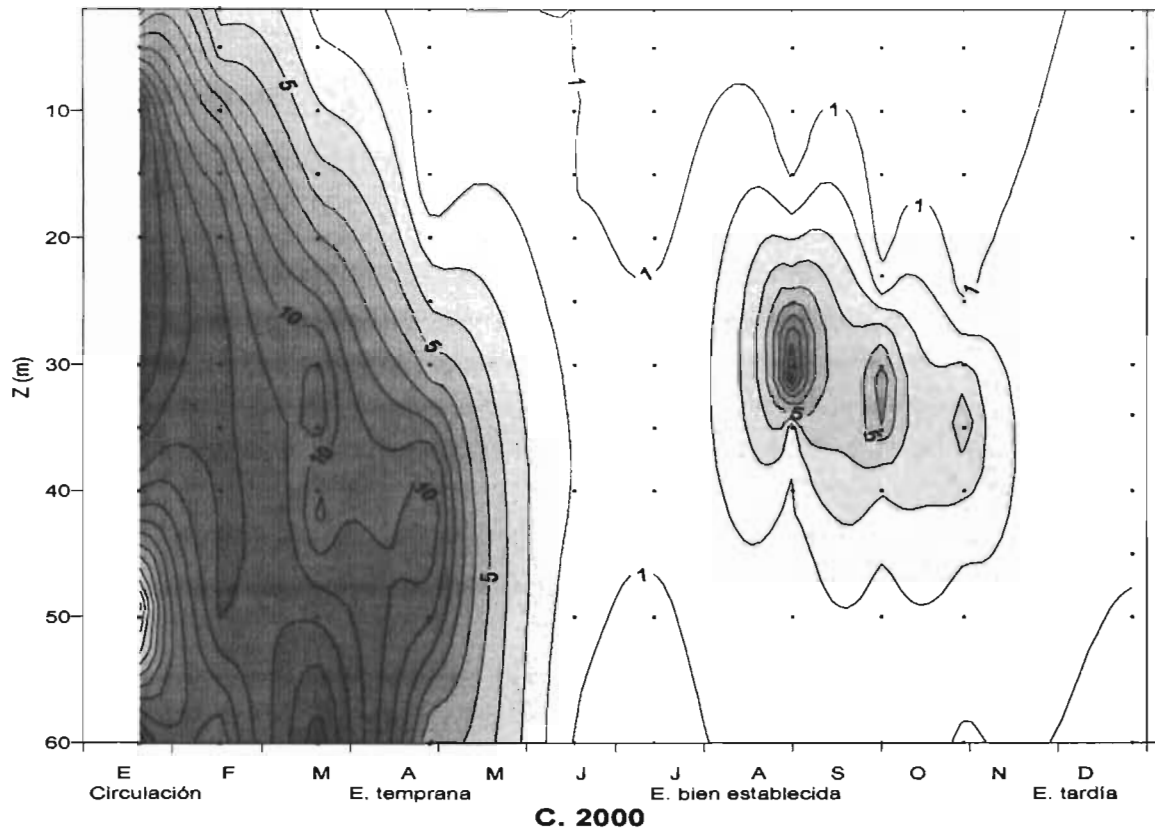
	C.	capa	E.Te	E.Es.	E.Ta
1998	0.64 ± 0.29*	Epi-	0.79 ± 0.59	0.77 ± 0.43	0.68 ± 0.11
		Meta-	3.96 ± 3.39	0.22 ± 0.03	0.29 ± 0.14
		Hipo-	0.36 ± 0.08	0.99 ± 0.31	1.05 ± 0.41
		N	15	15	15
		N= 5			
1999	2.61 ± 3.12	Epi-	2.41 ± 1.35	0.67 ± 0.08	4.75 ± 6.92
		Meta-	2.34 ± 1.48	2.84 ± 3.02	5.82 ± 5.97
		Hipo-	0.36 ± 0.22	0.25 ± 0.09	5.05 ± 6.51
		N	15	15	15
		N= 15			
2000	9.74 ± 1.69	Epi-	0.93 ± 0.52	0.46 ± 0.08	1.42 ± 0.21
		Meta-	1.70 ± 1.28	4.86 ± 3.66	4.38 ± 3.71
		Hipo-	3.42 ± 3.69	2.31 ± 0.67	0.80 ± 0.06
		N	32	30	20
		N= 30			
2001	7.71 ± 7.66	Epi-	1.30 ± 1.85	1.10 ± 0.21	2.08 ± 0.60
		Meta-	0.63 ± 0.60	2.27 ± 0.21	1.31 ± 0.51
		Hipo-	0.36 ± 0.21	1.57 ± 1.22	0.42 ± 0.32
		N	40	30	30
		N= 20			
2002	9.12 ± 2.38	Epi-	2.72 ± 1.97	1.11 ± 0.41	0.92 ± 0.12
		Meta-	3.56 ± 1.16	2.07 ± 0.36	0.84 ± 0.28
		Hipo-	6.06 ± 2.20	0.91 ± 0.65	0.43 ± 0.34
		N	40	30	20
		N= 20			



A. 1998



B. 1999



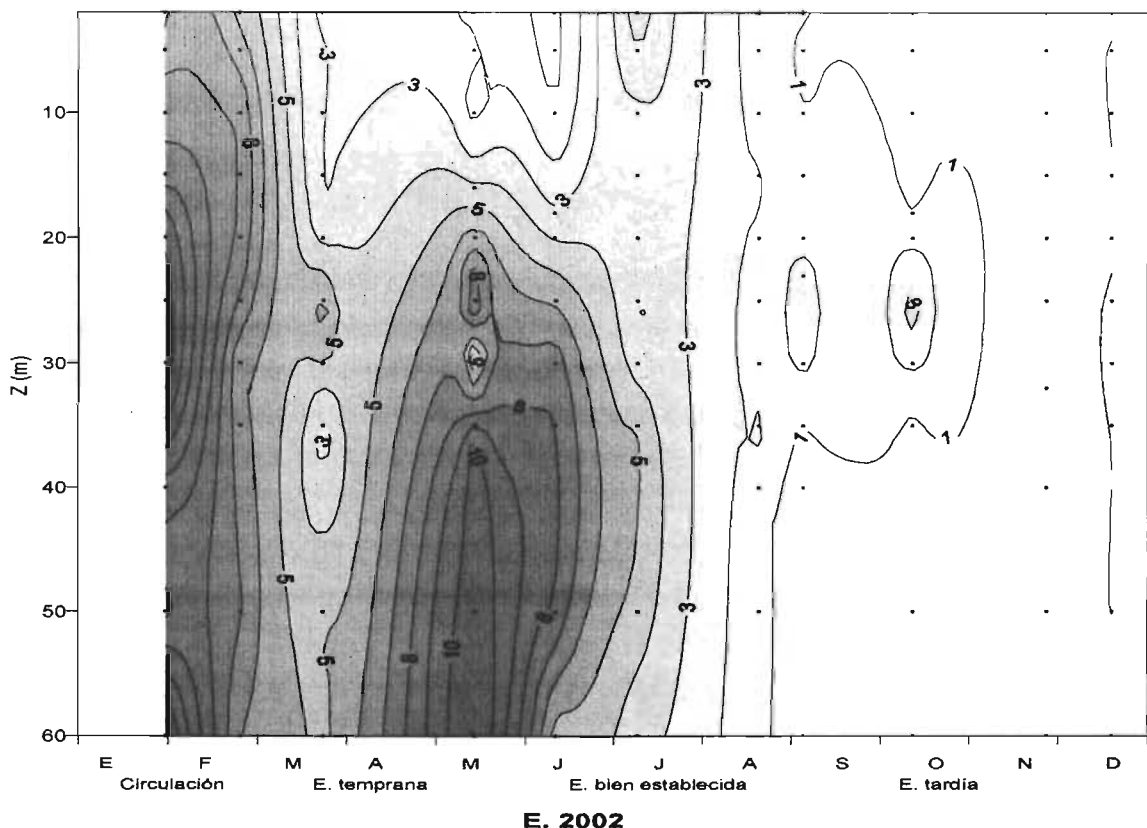


Fig. 40. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de concentración de clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$) correspondiente a la biomasa fitoplanctónica de la talla $> 2\mu\text{m}$ durante los años: A) 1998; B) 1999; C) 2000; D) 2001; E) 2002. Se señalan con marcadores (·) los puntos e intensidad de muestreo.

Las concentraciones de clorofila "a" de la biomasa fitoplanctónica $> 2\mu\text{m}$ integradas en la columna de agua presentaron un promedio global de $166.72 \pm 191\text{mg/m}^2$, con valores máximos en el año 2000 ($254.46 \pm 231.69\text{mg/m}^2$) y mínimos en 1998 ($91.37 \pm 83.38\text{mg/m}^2$).

El valor máximo se presentó durante la circulación del 2001 con 820.52mg/m^2 y el mínimo durante la estratificación temprana de este mismo año con 13.71mg/m^2 (Tabla 15, Fig. 41). Sus variaciones intra e interanuales fueron muy similares a aquellas de la biomasa fitoplanctónica total y su descripción es igualmente aplicable a esta talla (ver inciso 2.1.1).

Tabla 15. Clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m^2) correspondiente al fitoplancton $> 2\mu\text{m}$ (1998-2002). (C.= circulación; E.Te= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

	1998	1999	2000	2001	2002
promedio	91.37	127.82	254.46	135.15	224.37
d.e.	83.38	171.64	231.69	218.33	187.38
N	50	60	112	120	110
max.	297.91	C. 623.39	C. 643.95	C. 820.52	C. 632.61
min.	15.82	E. Ta. 18.75	E. Te. 50.66	E. Es. 13.71	E. Te. 41.67

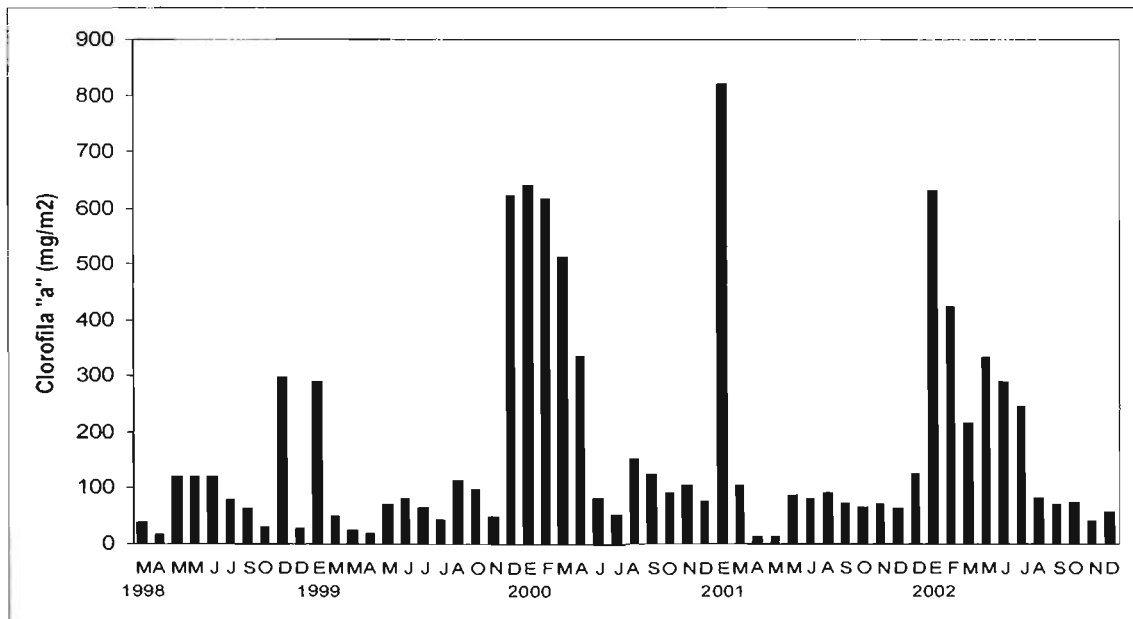


Fig. 41. Concentración de clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m²) correspondiente al fitoplancton > 2µm durante 1998-2002.

2.1.2.2 TALLA < 2µm

La biomasa fitoplanctónica la talla de fitoplancton menor a 2µm (*i.e.* picofitoplancton) expresada como clorofila "a" presentó un valor promedio de $0.66 \pm 0.75 \mu\text{g/L}$, con un valor máximo de $10.88 \mu\text{g/L}$ durante la circulación del año 2000 y un mínimo de $0.01 \mu\text{g/L}$ durante la estratificación temprana de 1999.

Las variaciones interanuales de esta talla de fitoplancton no fueron significativas aunque sí se observa un ligero aumento de las concentraciones de esta talla durante el 2002 (Fig. 42). Por otra parte, las variaciones entre año/periodo ($F= 2.07$; $p<0.01$) y por periodo del año ($F= 5.23$; $p<0.01$) fueron significativamente diferentes con sus máximos durante la circulación del lago (Tabla 16); sin embargo, es importante mencionar que valores similares al máximo se encontraron también durante la estratificación temprana de 2001, bien establecida de 1999 y tardía de 2002.

La talla de fitoplancton < 2µm presentó diferencias significativas ($F= 8.72$; $p<0.01$) entre estrato de la columna de agua, con sus mayores concentraciones en el metalimnion seguidas de cerca por aquellas del epilimnion (Fig. 42, Tabla 17). Esta distribución en la vertical fue muy clara en todos los años y especialmente marcada en 1999 donde se presentó una importante concentración en el DCM (base del metalimnion) (Fig. 43 B).

Se pudo observar que esta distribución diferencial en la vertical de esta talla de fitoplancton se mantuvo durante la estratificación. Durante la circulación, su distribución fue más homogénea en la vertical (Fig. 43).

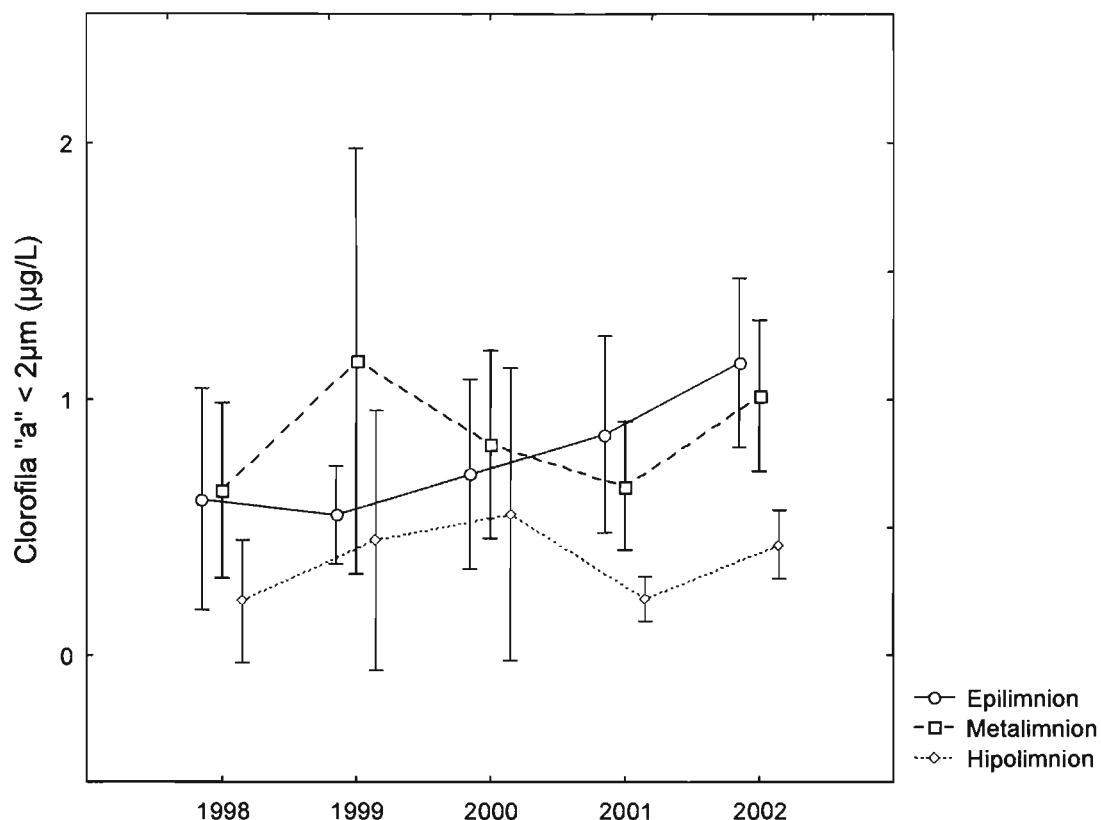


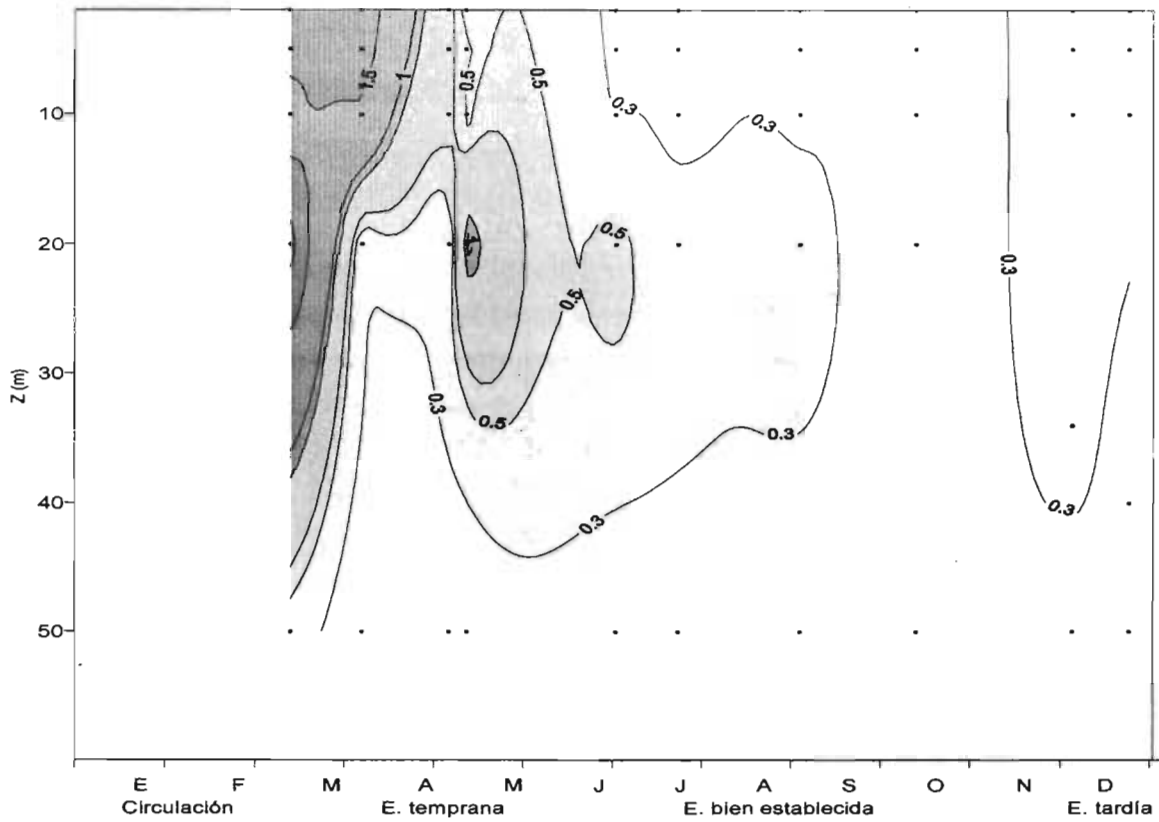
Fig. 42. Comparación de promedios de la concentración de clorofila "a" < 2µm entre los años muestreados y las capas del lago. Entre años; p= n.s. Entre capas; F= 8.72; p<0.01. (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

Tabla 16. Biomasa fitoplanctónica < 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promediada de 5 años (1998-2002) y promedios máximos y mínimos. (C. = circulación; E.Te= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E. Ta.= estratificación tardía).

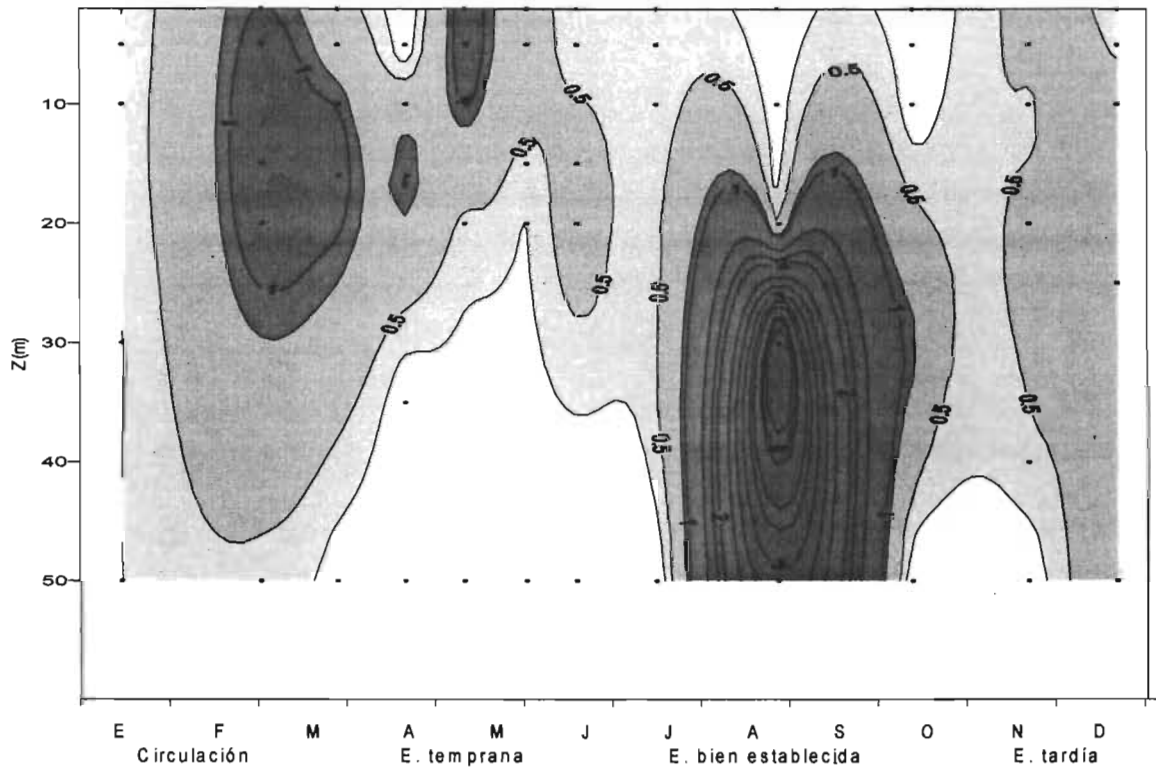
	C.	año	E.Te	año	E.Es.	año	E.Ta	año
promedio	0.84		0.59		0.50		0.66	
d.e.	0.26		0.09		0.24		0.33	
N	90		142		120		100	
max.	1.18	2002	0.70	2002	0.85	1999	1.23	2000
min.	0.45	1998	0.49	2000	0.26	1998	0.24	1998

Tabla 17. Biomasa fitoplanctónica < 2µm expresada como clorofila "a" (µg/L) promedio por año, estrato (epi-, meta- e hipolimnion) y periodo (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía). *La circulación del año 1998 esta subestimada debido a falta de datos de los dos primeros meses del periodo.

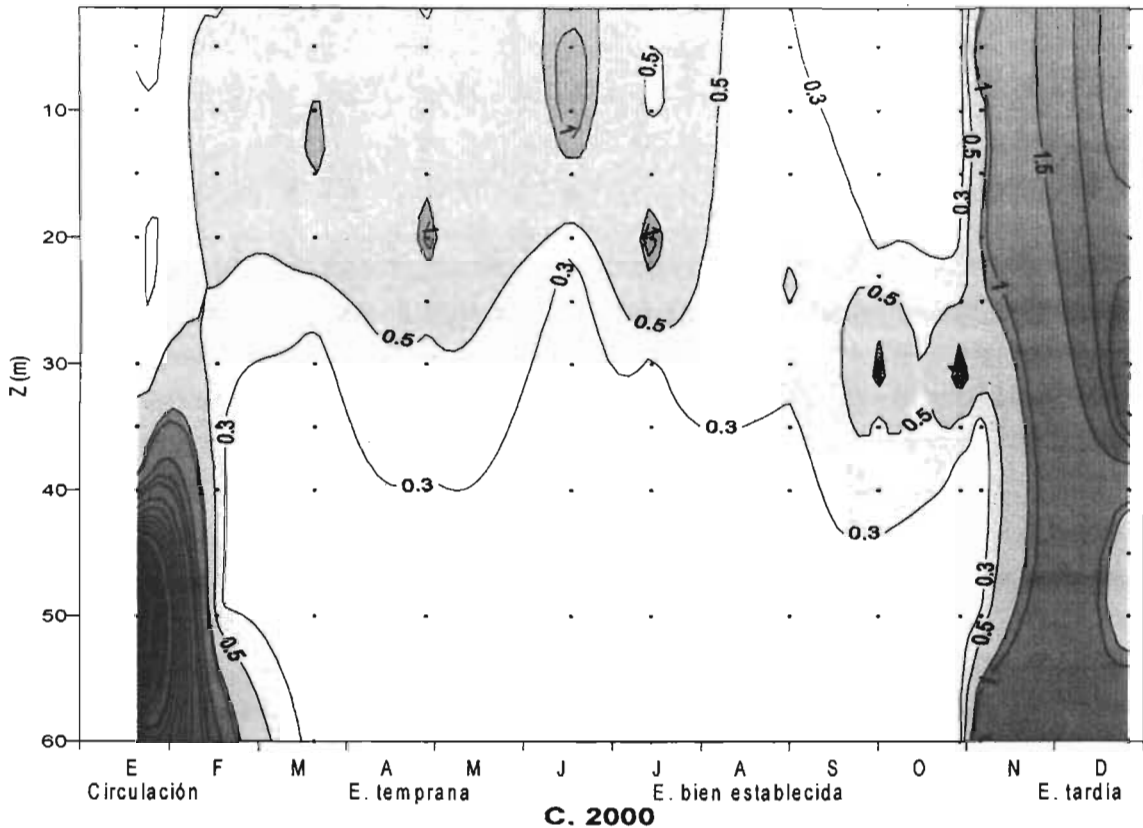
	Circ.	capa	E.Te	E.Es.	E.Ta
1998	0.45 ± 0.27*	Epi-	0.96 ± 0.69	0.22 ± 0.03	0.29 ± 0.14
		Meta-	0.96 ± 0.56	0.53 ± 0.06	0.23 ± 0.25
		Hipo-	0.08 ± 0.12	0.11 ± 0.03	0.09 ± 0.06
1999	0.67 ± 0.33	Epi-	0.75 ± 0.37	0.33 ± 0.08	0.41 ± 0.19
		Meta-	0.96 ± 0.25	1.99 ± 2.75	0.77 ± 0.27
		Hipo-	0.12 ± 0.01	1.01 ± 1.62	0.36 ± 0.44
2000	0.93 ± 0.65	Epi-	0.76 ± 0.27	0.23 ± 0.09	1.55 ± 0.78
		Meta-	0.75 ± 0.25	0.69 ± 0.21	1.61 ± 1.05
		Hipo-	0.18 ± 0.09	0.23 ± 0.03	0.48 ± 0.38
2001	0.99 ± 0.29	Epi-	0.90 ± 0.54	0.26 ± 0.17	0.72 ± 0.19
		Meta-	0.58 ± 0.43	0.47 ± 0.04	0.55 ± 0.29
		Hipo-	0.13 ± 0.06	0.27 ± 0.05	0.13 ± 0.03
2002	1.18 ± 0.03	Epi-	1.18 ± 0.49	0.89 ± 0.28	0.80 ± 0.42
		Meta-	0.95 ± 0.23	0.83 ± 0.60	0.84 ± 0.40
		Hipo-	0.40 ± 0.07	0.31 ± 0.08	0.32 ± 0.11



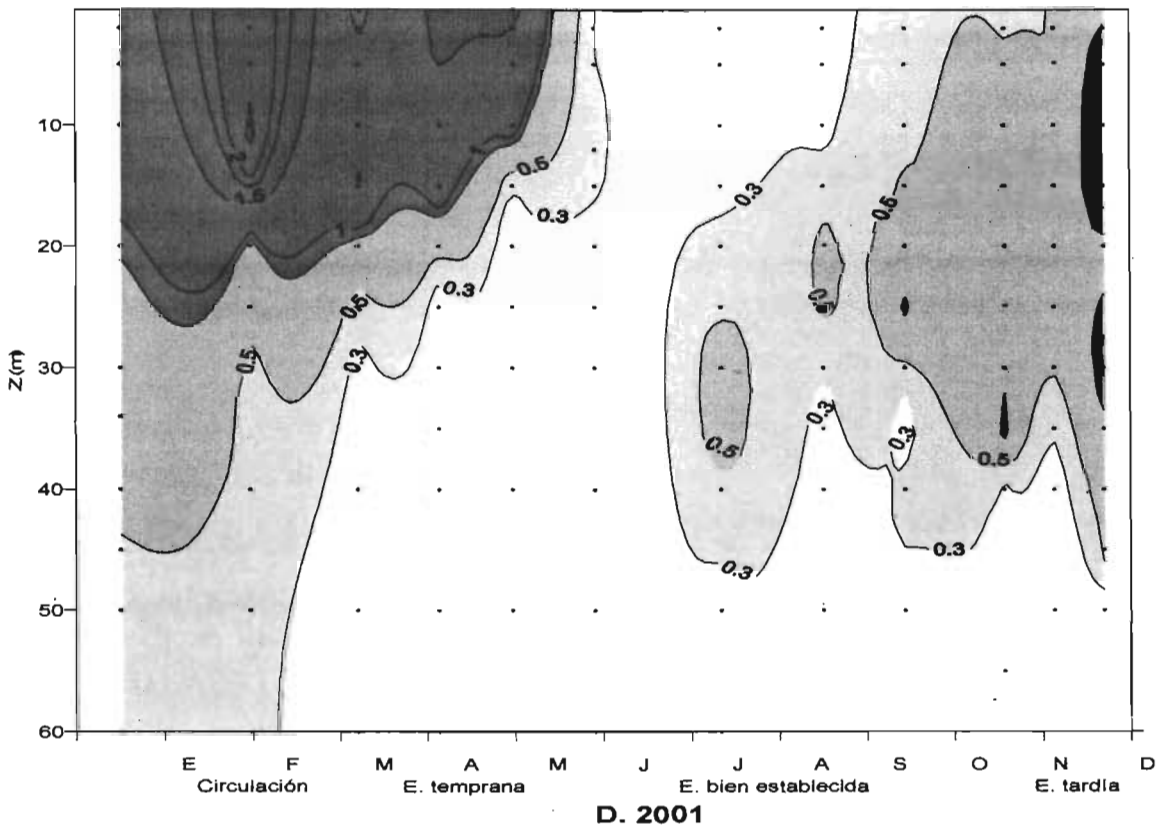
A. 1998



B. 1999



C. 2000



D. 2001

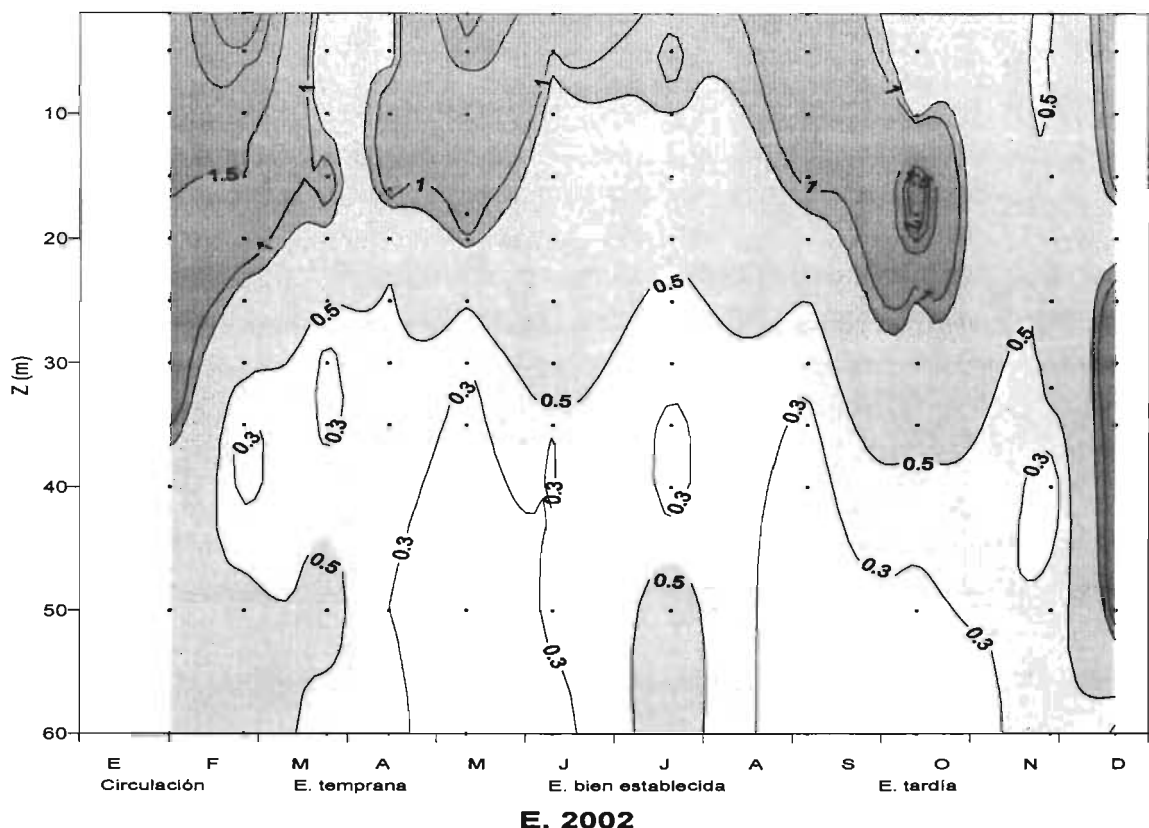


Fig. 43. Diagramas profundidad-tiempo de isopletas de concentración de clorofila "a" correspondiente a la talla $< 2\mu\text{m}$ ($\mu\text{g/L}$) durante los años: A) 1998; B) 1999; C) 2000; D) 2001; E) 2002. Se señalan con marcadores (·) los puntos e intensidad de muestreo.

La concentración de clorofila "a" integrada en la columna de agua correspondiente a la talla $< 2\mu\text{m}$ (Fig. 44) presentó un promedio de $34.5 \pm 25.3\text{mg/m}^2$. La variación de la concentración por año fue relativamente baja presentando sus valores promedios máximos en el año 2000 y 2002 con $42.6 \pm 26.7\text{mg/m}^2$ y $44.4 \pm 14.7\text{mg/m}^2$, respectivamente, y los mínimos en 1998 con $22.87 \pm 16.41\text{mg/m}^2$ (Tabla 18).

Con relación a la variación intra-anual de la biomasa fitoplanctónica $< 2\mu\text{m}$, presentó rangos de variación entre 5.13 y 141.09mg/m^2 .

Tabla 18. Clorofila "a" integrada en la columna de agua (mg/m^2) correspondiente a fitoplancton $< 2\mu\text{m}$ (1998-2002). (C.= circulación; E.Te. = estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

	1998	1999	2000	2001	2002
promedio	22.87	31.78	42.56	30.52	44.42
d.e.	16.41	26.66	40.38	16.67	14.69
N	50	60	112	120	110
max.	63.32	C. 111.94	E. Es. 141.09	C. 69.23	C. 69.99
min.	5.13	E. Ta. 15.36	C. 17.45	E. Es. 10.10	E. Es. 26.06

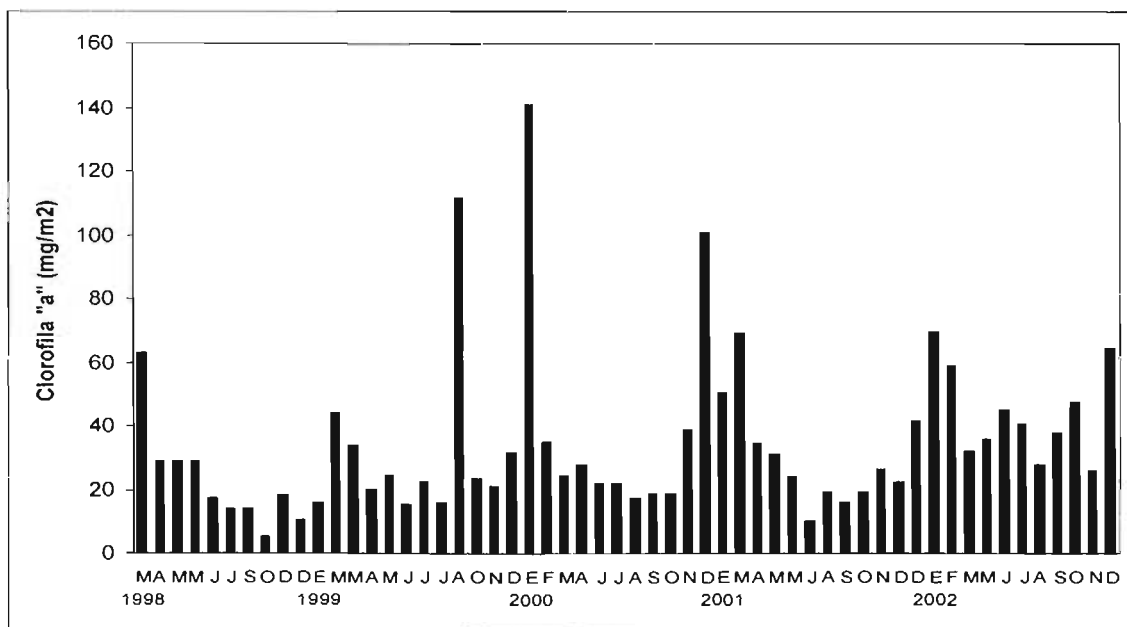


Fig. 44. Concentración de clorofila "a" correspondiente al fitoplancton < 2µm integrado en la columna de agua (mg/m²) durante el periodo 1998-2002.

2.2 PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN A LA BIOMASA TOTAL

2.2.1 PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE LA TALLA > 2µm

El fitoplancton correspondiente a la talla > 2µm (*i.e.* nano y microfitoplancton) fue dominante en el lago Alchichica, ya que en promedio (1998-2002) su porcentaje de contribución a la biomasa fitoplanctónica total fue de 70.83 ± 2.02%. En todos los años se presentaron valores cercanos al 70%, siendo 1999 el año con el máximo porcentaje (72.38 ± 16.57%) y el 2001 con el mínimo (67.5 ± 26.69%) (Tabla 19). Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas.

Tabla 19. Porcentajes promedio de contribución de la talla > 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por año.

%	
1998	70.4 ± 25.2
N	50
1999	72.38 ± 16.57
N	60
2000	71.66 ± 25.14
N	112
2001	67.50 ± 26.69
N	120
2002	72.2 ± 20.66
N	110

Por otra parte, tampoco fue significativa la variación entre periodos; el valor máximo de contribución se presentó durante la estratificación bien establecida ($77.13 \pm 10.33 \%$) y el mínimo en la estratificación temprana ($65.14 \pm 18.36\%$) (Fig. 45, Tabla 20). Esta diferencia por periodos no fue significativa (Fig. 45) debido a que la diferencia entre año/periodo fue significativa ($F= 4.78$; $p<0.01$), esto quiere decir que entre los cinco años muestreados los periodos presentaron diferentes contribuciones de la talla $> 2\mu\text{m}$.

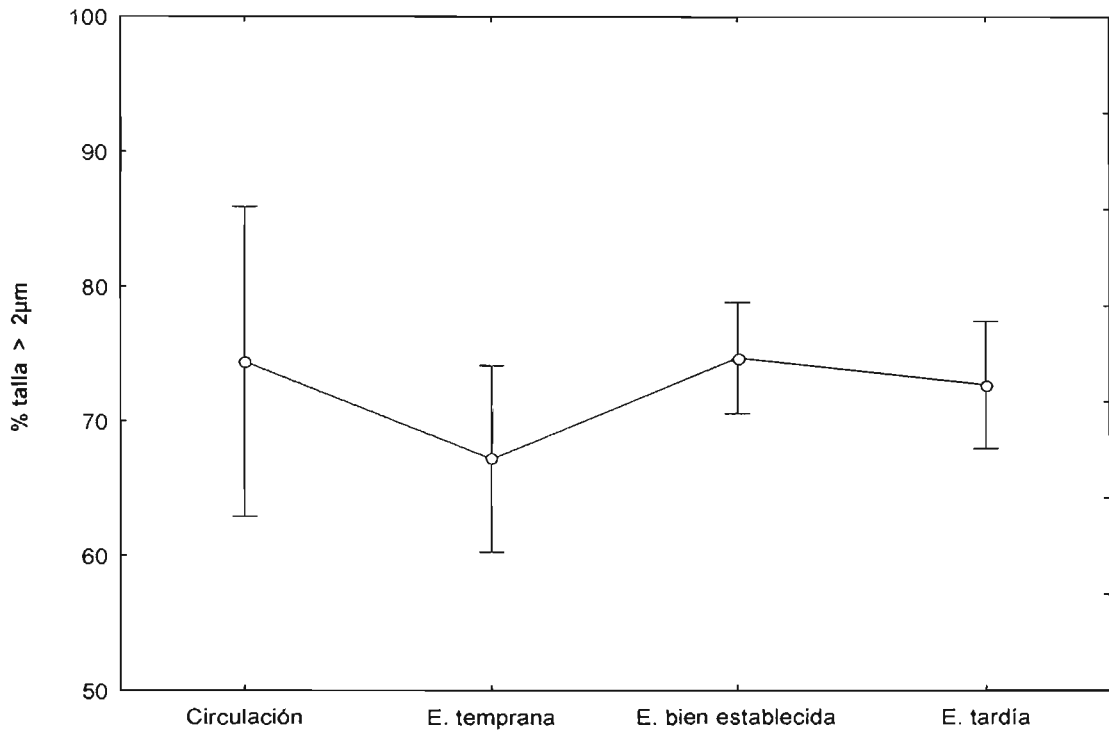


Fig. 45. Comparación entre los promedios de porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ entre los periodos del año. $p=n.s.$ (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

Tabla 20. Porcentajes promedio (1998-2002) de contribución de la talla $> 2\mu\text{m}$ a la biomasa fitoplanctónica total por periodo. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

%	
C.	76.36 ± 24.69
N	90
E.Te	65.14 ± 18.36
N	142
E.Es	77.13 ± 10.33
N	120
E.Ta	70.78 ± 11.41
N	100

Esta diferencia entre año/periodo se puede observar en la Fig. 46, en donde se aprecia que fue durante la estratificación temprana del 2001 donde se presentaron los menores porcentajes de aportación de la talla $> 2\mu\text{m}$, en contraste con los años 2000 y 2002 cuando se presentaron los mayores porcentajes de aportación (Tabla 19) sobre todo durante los periodos de circulación. Estos mismos periodos presentaron, como se describió anteriormente, los máximos valores de clorofila "a" muestreados.

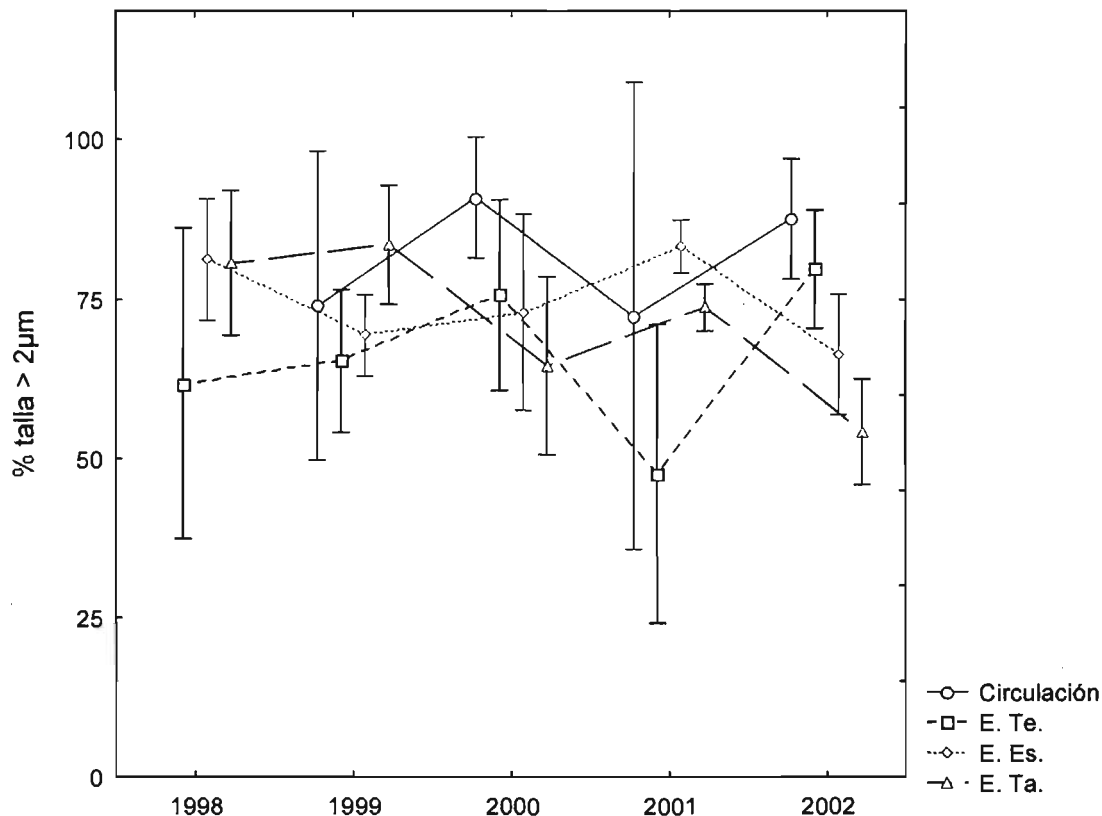


Fig. 46. Comparación entre promedios del porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ en los periodos del año. $F(12,148) = 4.92$; $p < 0.01$ (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95). (E.Te.= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

Finalmente, la diferencia del porcentaje de contribución de la talla $> 2\mu\text{m}$ entre estratos del lago (epi-, meta- e hipolimnion) fue significativa ($F=7.85$; $p < 0.01$) con porcentajes que incrementan con la profundidad, es decir, los porcentajes de contribución más elevados se encontraron en el hipolimnion y los mínimos en el epilimnion. (Fig. 47, Tabla 21).

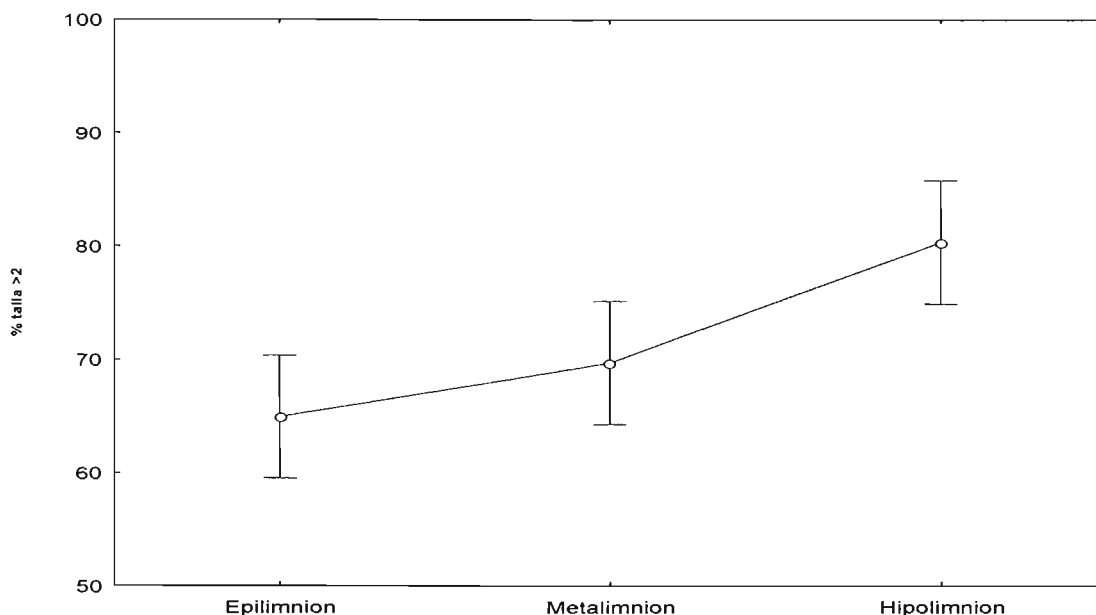


Fig. 47. Comparación entre los promedios del porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla > 2µm en los estratos del lago. F (2,153)= 8.293; p<0.01. (Las barras denotan intervalos de confianza de 0.95).

Tabla 21. Porcentajes promedio de contribución de la talla > 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por capa (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo. (C.= circulación; E.Te.= estratificación temprana; E.Es.=estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

Año	C.	Capa	E.Te	E.Es.	E.Ta
1998	32.61 ± 15.40	Epi-	46.91 ± 31.94	75.22 ± 8.03	71.21 ± 8.66
1999			68.02 ± 16.52	67.15 ± 8.23	77.13 ± 16.5
2000			66.45 ± 16.81	59.69 ± 18.71	54.63 ± 10.92
2001			36.26 ± 41.12	88.24 ± 2.95	74.02 ± 0.82
2002			64.10 ± 24.69	55.39 ± 5.04	54.45 ± 9.32
1998		Meta-	61.98 ± 46.93	72.37 ± 6.78	89.64 ± 8.72
1999			57.84 ± 25.4	73.03 ± 11.32	74.85 ± 11.09
2000			94.63 ± 1.64	80.88 ± 13.02	71.23 ± 24.98
2001			73.12 ± 21.68	38.18 ± 37.05	82.65 ± 2.05
2002			86.48 ± 4.72	77.94 ± 7.9	72.97 ± 13.69
1998		Hipo-	76.63 ± 11.72	96.10 ± 1.62	81.37 ± 21.54
1999			70.24 ± 10.01	74.01 ± 5.76	92.22 ± 2.88
2000			95.68 ± 2.93	88.26 ± 1.75	72.61 ± 20.33
2001			39.93 ± 22.58	84.97 ± 7.01	73.79 ± 7.08
2002			93.13 ± 2.99	70.85 ± 10.82	56.70 ± 13.07

En la Figura 48 se observa de forma esquematizada la clara predominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$ en el Lago Alchichica; solamente en cuatro ocasiones la talla pequeña presentó mayores porcentajes que la talla grande, tres en la estratificación temprana (dominancia en 1998 y 2001 y codominancia en 1999) y la cuarta en la estratificación tardía (codominancia en 2000).

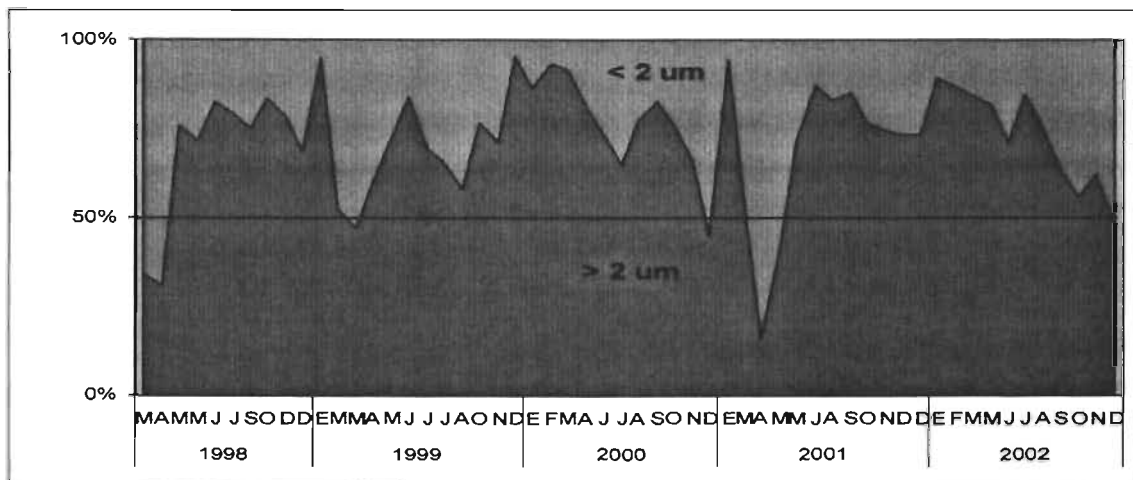


Fig. 48. Porcentaje de contribución de las dos tallas de fitoplancton a la biomasa fitoplanctónica total durante 1998-2002.

En la Fig. 49 se puede observar que la predominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$ ocurre principalmente en el hipo y metalimnion, como se había mencionado con anterioridad, sin embargo en una ocasión (estratificación temprana del 2001) la concentración de clorofila "a" disminuyó tanto (en especial de la clorofila "a" $> 2\mu\text{m}$; $0.1\mu\text{g/L}$) que ocasionó que una baja cantidad del picofitoplancton o talla $< 2\mu\text{m}$ ($0.2\mu\text{g/L}$) fuera suficientes para doblar la cantidad de la talla grande. Asimismo, se pudo apreciar que el periodo en el que la predominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$ disminuyó o incluso cambió la talla predominante a la $< 2\mu\text{m}$ fue durante la estratificación temprana de 1998, 1999 y 2001 y la estratificación tardía del año 2000. Sólo en el año 2002 la talla $> 2\mu\text{m}$ dominó casi por completo en todos los estratos y periodos del año, aunque presentó codominancia con la talla $< 2\mu\text{m}$ durante la estratificación tardía.

La curva de cambio de la variación de la contribución de la talla $> 2\mu\text{m}$ en los tres estratos del lago es poco modelable estadísticamente, aunque muestra un comportamiento general. Durante la circulación hay un aumento del porcentaje de contribución de esta talla (lo cual corresponde al florecimiento invernal de diatomeas); posteriormente, se observan alternados años que presentan una disminución de contribución durante la estratificación temprana hasta llegar al mínimo, para volver a aumentar a finales de la estratificación temprana (cambio asociado al florecimiento de cianobacterias filamentosas), con años en los que no se presenta esta disminución. La dominancia prosigue en la estratificación bien establecida. Finalmente, durante la estratificación tardía, se encuentran alternados años en los que existe una dominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$ durante todo el año, con años con una tendencia a la disminución de la contribución a finales del año.

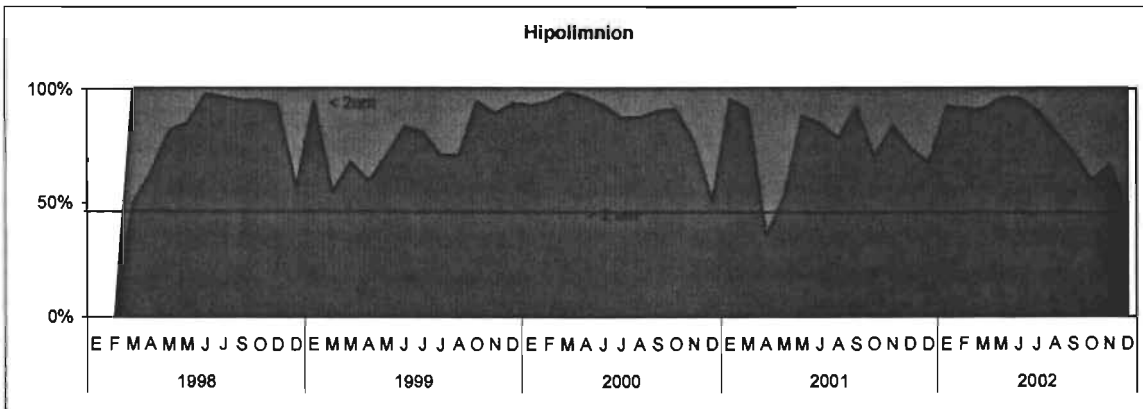
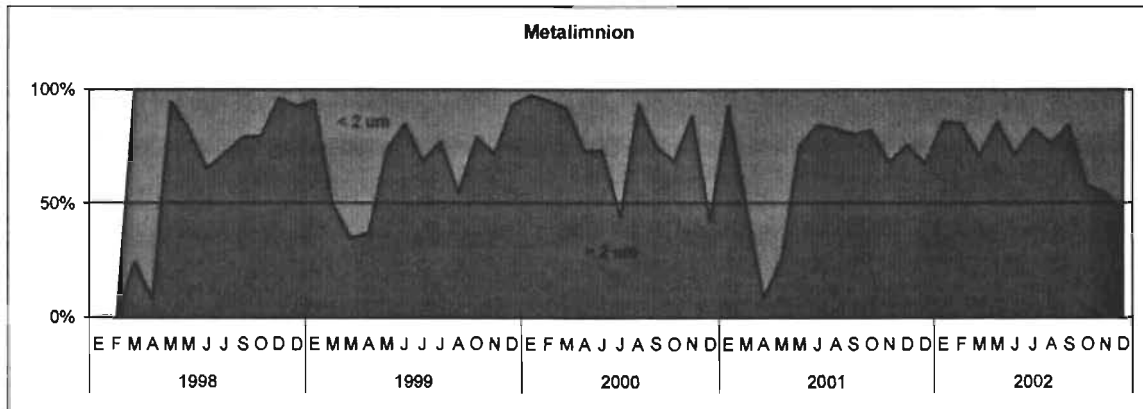
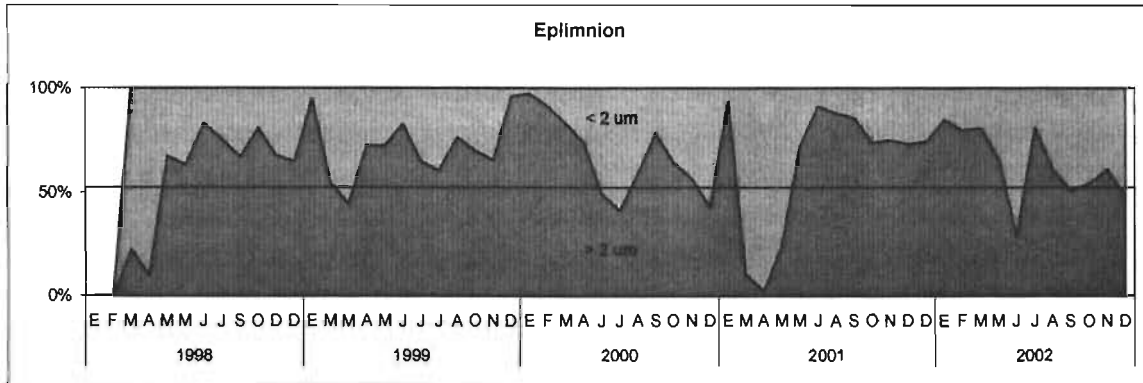


Fig. 49. Porcentaje de contribución de las dos tallas (> y < 2 μ m) de fitoplancton a la biomasa fitoplanctónica total durante 1998-2002 en el epi-, meta- e hipolimnion del lago Alchichica.

Se pudo observar que el cambio de la predominancia de las tallas se debe principalmente a una disminución de la talla grande lo que ocasiona que la talla $<2\mu\text{m}$ (con concentraciones menos fluctuantes) sobrepase los porcentajes de aportación a la biomasa total de la talla $>2\mu\text{m}$ (Fig. 50).

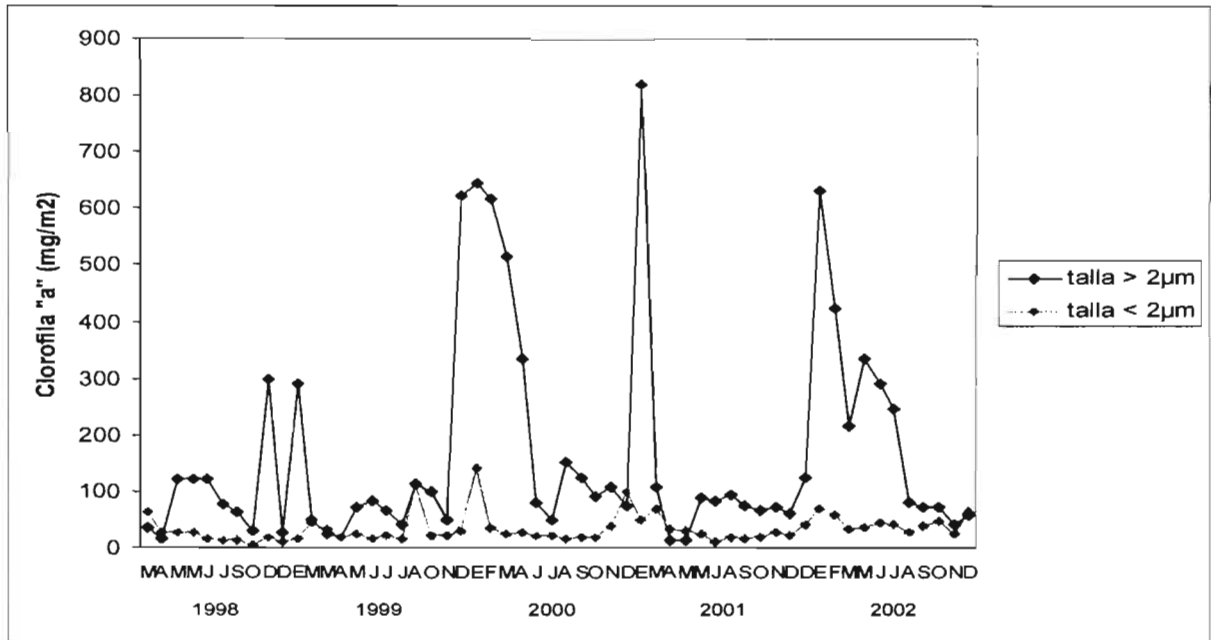


Fig. 50. Clorofila "a" integrada de la talla $>$ y $<$ a $2\mu\text{m}$.

Finalmente, se pudo detectar un aumento en el porcentaje de contribución de la talla $>2\mu\text{m}$ asociado al aumento de las concentraciones de clorofila "a" total (Fig. 51)

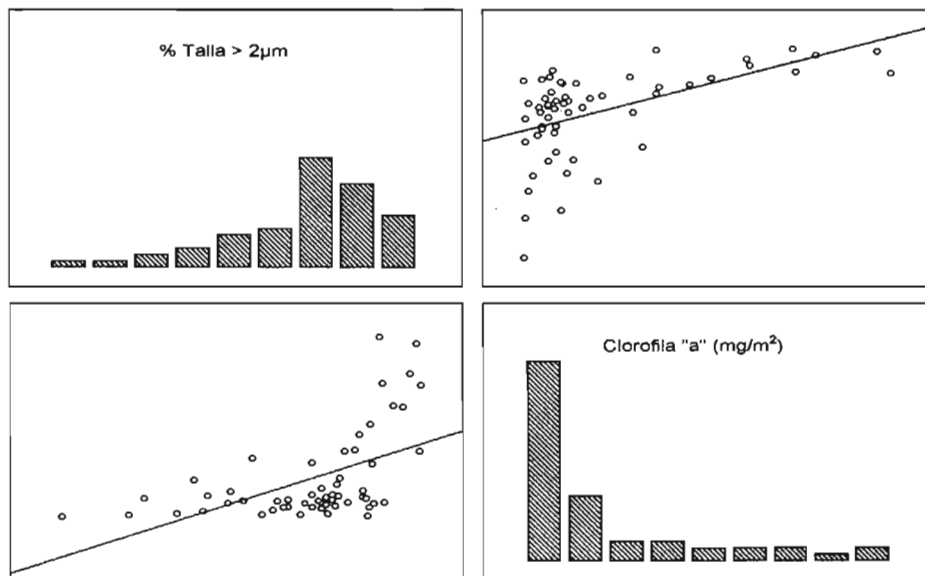


Fig. 51. Correlación entre la aportación en porcentaje de la talla $>2\mu\text{m}$ y la clorofila "a" total integrada. $F=0.53$; $p<0.05$.

2.2.2 PORCENTAJE DE CONTRIBUCIÓN DE LA TALLA < 2µm

El fitoplancton correspondiente a la talla < 2µm (*i.e.* picofitoplancton) en el lago Alchichica presentó un porcentaje de contribución a la biomasa fitoplanctónica total promedio de $28.15 \pm 21.23\%$. En los cinco años muestreados (1998-2002) este porcentaje fue similar, aunque el año con mayor aportación fue 2001 ($32.5 \pm 26.69\%$) y el año con menor fue el 2000 ($22.47 \pm 18.14\%$), (Tabla 22), siendo estas diferencias entre años no significativas.

Tabla 22. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por año

	%
1998	29.6 ± 25.23
N	50
1999	27.62 ± 16.57
N	60
2000	22.47 ± 18.14
N	112
2001	32.5 ± 26.69
N	120
2002	27.8 ± 16.33
N	110

Esta talla presentó su mayor aportación durante la estratificación temprana ($34.87 \pm 18.21\%$) y la mínima durante la estratificación bien establecida ($22.87 \pm 10.32\%$) (Tabla 23).

Por otro lado, su mayor porcentaje de contribución se presentó en el epilimnion y el mínimo en el hipolimnion. El máximo de contribución se dio durante la estratificación temprana en el epilimnion y el mínimo en la estratificación bien establecida en el hipolimnion (Tablas 24 y 25).

Tabla 23. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por periodo (C.= circulación; E.Te= estratificación temprana; E.Es= estratificación bien establecida; E.Ta= estratificación tardía).

	%
C.	23.64 ± 22.73
N	90
E.Te	34.87 ± 18.21
N	142
E.Es	22.87 ± 10.32
N	120
E.Ta	29.22 ± 11.40
N	100

Tabla 24. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por capa (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo (C.= circulación; E.Te= estratificación temprana; E.Es= estratificación bien establecida; E.Ta= estratificación tardía).

capa	C.	E.Te	E.Es	E.Ta
Epi-		45.45 ± 16.55	34.17 ± 8.26	28.93 ± 12.69
Meta-	23.64 ± 24.69	37.03 ± 15.7	27.79 ± 0.91	20.94 ± 8.66
Hipo-		22.13 ± 17.83	13.32 ± 10.3	18.61 ± 5.47

Tabla 25. Porcentajes promedio de contribución de la talla < 2µm a la biomasa fitoplanctónica total por año, capa (epi-, meta- e hipolimnion) y por periodo (C.= circulación; E.Te= estratificación temprana; E.Es.= estratificación bien establecida; E.Ta.= estratificación tardía).

Año	C.	Capa	E.Te	E.Es.	E.Ta	
1998	67.62 ± 15.00	Epi-	53.09 ± 31.94	24.78 ± 8.03	28.79 ± 8.66	
1999			31.98 ± 16.52	37.43 ± 8.23	23.08 ± 16.50	
2000			30.36 ± 17.83	40.31 ± 18.71	45.37 ± 10.92	
2001			63.74 ± 41.12	11.76 ± 2.95	25.98 ± 0.82	
2002			35.90 ± 24.69	44.61 ± 5.04	45.55 ± 9.32	
1998		Meta-	38.02 ± 46.93	27.63 ± 6.78	10.36 ± 8.72	
1999			25.98 ± 1.25	42.16 ± 25.40	33.00 ± 11.32	18.52 ± 11.09
2000			5.37 ± 1.64	21.08 ± 11.23	28.77 ± 24.98	33.27 ± 23.23
2001			27.59 ± 20.59	61.82 ± 37.05	17.35 ± 2.05	26.57 ± 7.00
2002			13.52 ± 4.72	22.06 ± 7.90	27.03 ± 13.69	48.49 ± 5.17
1998	Hipo-	23.37 ± 11.72	3.90 ± 1.62	18.63 ± 21.54		
1999		29.76 ± 10.01	25.99 ± 5.76	7.78 ± 2.88		
2000		4.32 ± 2.93	11.74 ± 1.75	27.39 ± 20.33		
2001		60.07 ± 22.58	15.03 ± 7.01	26.21 ± 7.08		
2002		5.95 ± 2.99	29.15 ± 10.82	42.38 ± 13.07		

En un panorama general (Fig. 48 y 49) se pudo observar que existió cierto patrón de variación temporal en el porcentaje de contribución de la talla < 2µm; años en los cuales presentó valores altos de contribución durante la estratificación temprana (máximos de hasta 91.4%, 2001) y bajos el resto de los periodos del año (1998,1999 y 2001), alternando con años en los que presentó porcentajes bajos de contribución todo el año con incrementos durante la estratificación tardía (2000 y 2002).

3. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

El análisis de series de tiempo de la clorofila "a" integrada total (Fig. 52) mostró como periodos significativos de variación a los periodos de: 28, 14.2, 11.4, 6.3, 5.7 y 4.1 meses.

El primer valor (28) representa una variación aproximadamente bianual (24 meses) en los años muestreados. El segundo pico, constituido por los periodos 14.2 y 11.4 (promedio= 12.8), correspondió a la ciclicidad anual (12 meses). El tercer pico conformado por los periodos 6.3 y 5.7 (promedio= 6 meses) se refirió a la variación de medio año (6 meses). Finalmente, el último pico correspondió al periodo 4.1, esto es, al periodo correspondiente a un tercio de año.

Es importante mencionar que a pesar de que el periodo aproximadamente bianual (28 meses) presentó la señal más fuerte, ésta desaparece al aplicar un filtro de grado uno ($f=1$) (de la misma forma que el periodograma de la talla $>2\mu\text{m}$) por lo que puede no ser significativo de la variación de la clorofila "a" integrada.

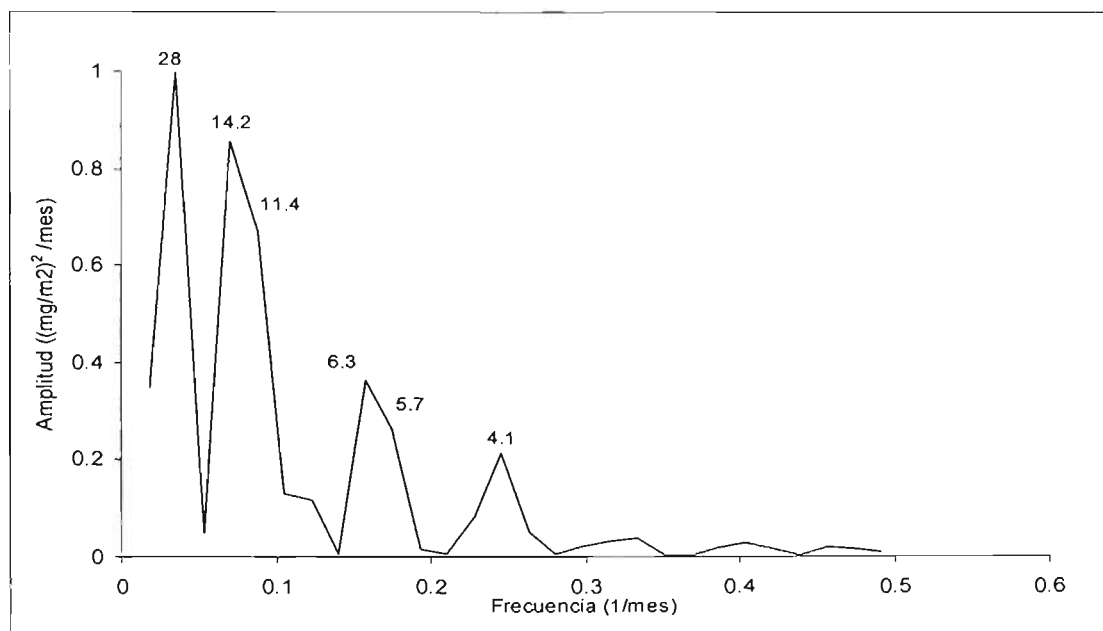


Fig. 52. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de la clorofila "a" total integrada (mg/m^2). Los valores en la gráfica representan los periodos (meses).

El análisis de series de tiempo para los valores integrados de la clorofila "a" correspondiente a la talla $> 2\mu\text{m}$, mostró –como era esperado– periodos casi idénticos a aquellos de la clorofila total (Fig. 53). La única diferencia importante fue que esta talla de fitoplancton mostró al periodo anual como la señal más fuerte en lugar del periodo bianual.

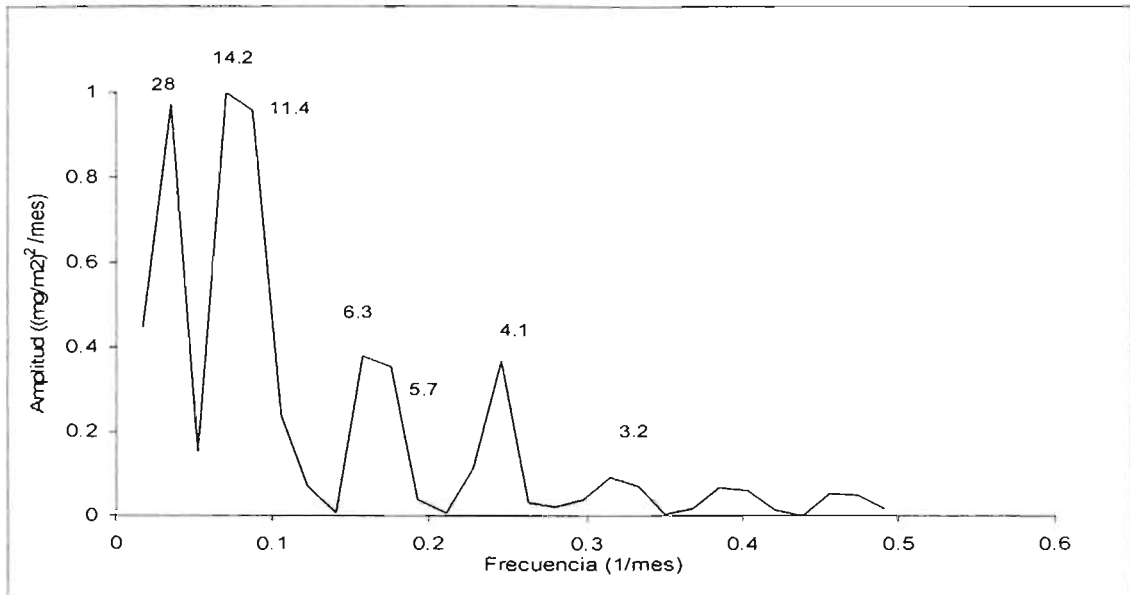


Fig. 53. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de la clorofila "a" integrada de la talla > 2µm (mg/m²). Los valores en la gráfica representan los periodos (meses).

Por último, el análisis de series de tiempo de la talla de picofitoplancton (Fig. 54) mostró diferencias con relación al fitoplancton total y a la talla > 2µm. Sus periodos más importantes fueron en orden descendente; 11.4, 19, 5.7, 5.4, 3.6 y 4.1. Es decir, que tuvo una periodicidad anual (11.9 meses), de año y medio (11.9 meses), de año y medio (5.7 y 5.4) y un trimestral (3.6, 4.1).

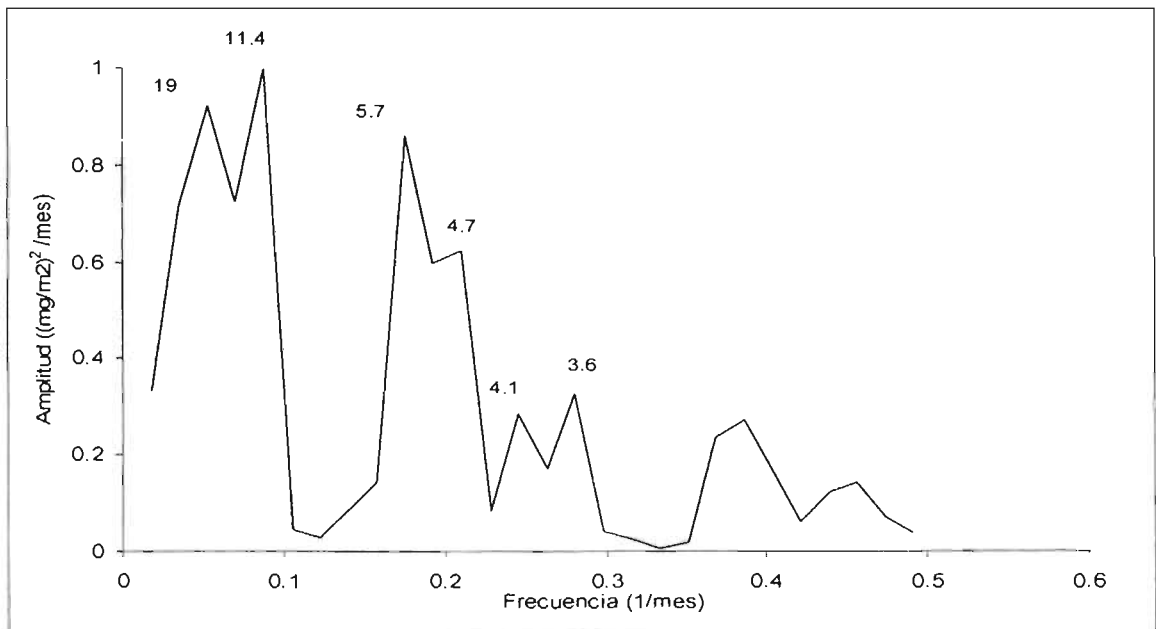


Fig. 54. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de la clorofila "a" integrada de la talla < 2µm (mg/m²). Los valores en la gráfica representan los periodos (meses).

Finalmente, la curva de cambio de la variación de la contribución de la talla $>2\mu\text{m}$ en porcentaje mostró como su periodo más importante el de 19 meses (Fig. 55). La siguiente señal tuvo un periodo semestral (6.3 meses). Finalmente, el periodograma mostró otros periodos menos importantes de 9.5, 4.5 y 5.2 meses.

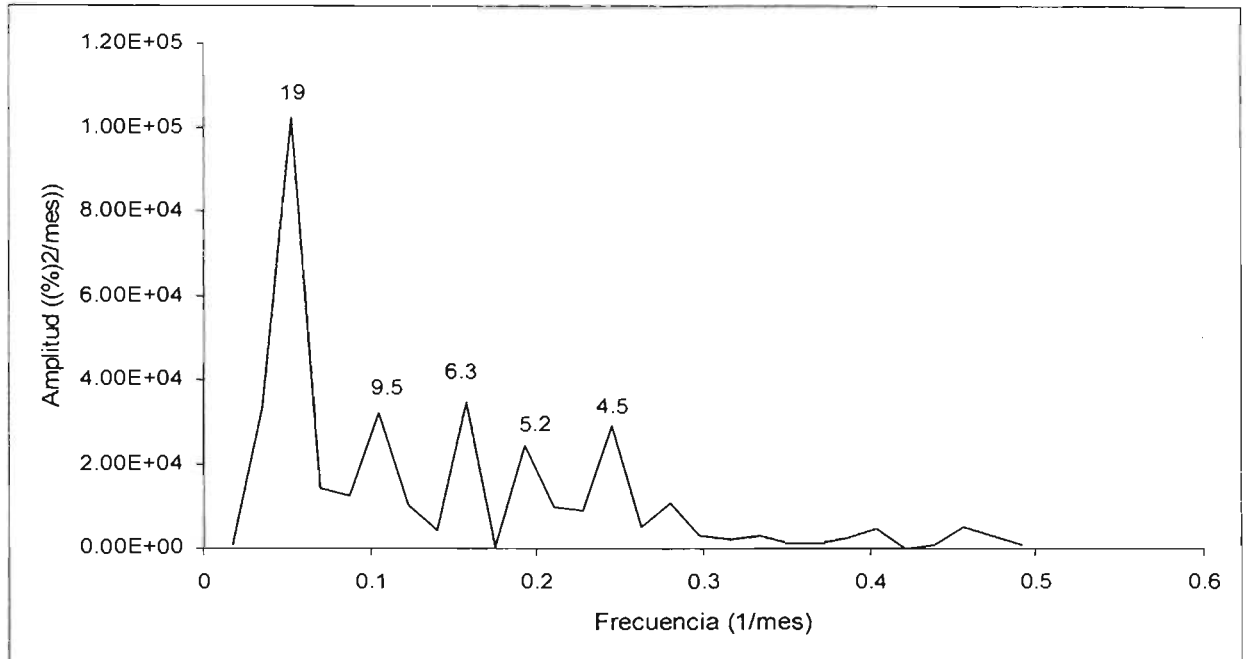


Fig. 55. Periodograma de la serie de tiempo de cinco años de los porcentajes de contribución a la biomasa total de la clorofila "a" $> 2\mu\text{m}$ (%). Los valores en la gráfica representan los periodos (meses).

4. RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS LACÚSTRES, ATMOSFÉRICOS Y BIOLÓGICOS

En la siguiente tabla (Tabla 26) se realizó un resumen esquemático de las condiciones ambientales (físicas y químicas de la Z_{EU}) y meteorológicas prevalecientes en el Lago Alchichica durante los periodos característicos de su hidrodinámica (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía) así como de la concentración total y fraccionada de biomasa fitoplanctónica expresada como clorofila "a". Las variables ambientales consideradas son las que más influencia tienen en las variables determinantes de la producción de biomasa fitoplanctónica, i.e. luz, temperatura, nutrientes y suspensión de las células dentro de la Z_{EU} .

Tabla 26. Parámetros físico-químicos y biológicos característicos de la Z_{EU} por periodo (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía) del lago Alchichica. (* los valores dobles de la estratificación temprana se refieren a los promedios de los años 1999, 2001 / 2000, 2002).

PARÁMETRO			PERÍODO			
			Circulación	Estratificación Temprana	Estratificación Bien establecida	Estratificación Tardía
Físicos	Zeu	profundidad (m)	baja 16.4 ± 2.1	media 19.3 ± 2.2	alta 23.8 ± 4.3	muy alta 29.9 ± 6.8
		Zmix	profundidad (m)	amplia 12.9 ± 3.4	baja 16.1 ± 3.8	media 16.1 ± 3.8
	Temperatura		baja 14.07 ± 3.24	alta 16.9 ± 1.45	muy alta 17.62 ± 1.28	media 16.04 ± 1.11
		distribución en Z	homogénea	heterogénea	muy heterogénea	heterogénea
	Termoclina	profundidad (m)	-	superficial 11.28 ± 3.65	media profundidad 14.81 ± 5.0	profunda 31.21 ± 7.6
grosor (m)		-	angosta 11.51 ± 4.85	gruesa 13.07 ± 4.06	angosta 7.36 ± 4.43	
Estabilidad	(mg/ml/m)	baja 0.71 ± 1.3	baja 2.82 ± 3.09	alta 2.86 ± 4.58	media 1.14 ± 3.03	
	columna DCM			5.98 ± 5.77	5.70 ± 5.74	
Químicos	P (PO4)	concentración (µmol/L)	alta 1.71 ± 1.75	baja / media 0.12 ± 0.29 / 0.91 ± 0.77	media 0.36 ± 0.33	media 0.52 ± 0.37
		distribución en Z	homogénea	poco heterogénea	medio heterogénea	muy heterogénea
	N (NH4)	concentración (µmol/L)	alta 7.4 ± 6.52	baja / media 1.82 ± 3.14 / 3.34 ± 2.47	media 3.72 ± 3.51	alta 6.69 ± 6.36
distribución en Z		homogénea	poco heterogénea	medio heterogénea	muy heterogénea	
Si (SiO4)	concentración (µmol/L)	baja 2.57 ± 3.3	media 3.89 ± 2.98	alta 4.69 ± 3.86	muy alta 6.74 ± 5.21	
	distribución en Z	homogénea	poco heterogénea	medio heterogénea	muy heterogénea	
Meteorológicos	Temperatura aire	promedio mensual (°C)	baja 12.0 ± 1.67	muy alta 16.17 ± 0.86	alta 15.32 ± 0.77	media 12.25 ± 1.9
		Precipitación	mensual (mm)	casi nula 2.01 ± 3.06	baja 23.68 ± 22.93	alta 61.76 ± 36.31
	Tormentas	número al mes	nulo	muy bajo 4 ± 4	alto 11 ± 7	bajo 6 ± 7
			altos 6 ± 3	bajo 4 ± 3	medio 5 ± 3	alto 10 ± 4
	Evaporación	mensual (mm)	baja 146.9 ± 18.37	alta 192.68 ± 46.12	media 138.53 ± 34.06	muy baja 111.5 ± 5.79
			Viento	velocidad (m/s)	3.0 ± 0.96	media 2.14 ± 0.58
	distribución en Z	grande 9.0 ± 3.32	media 7.66 ± 2.07	media 7.47 ± 1.84	grande 8.39 ± 2.97	
Biológicos	Clorofila total	concentración (µg/L)	alta 7.17 ± 3.8	alta / baja 5.88 ± 5.16 / 2.23 ± 1.8	baja 2.2 ± 0.5	media 2.9 ± 1.6
		distribución en Z	homogénea	poco heterogénea	muy heterogénea	medio heterogénea
	Clorofila > 2µm	concentración (µg/L)	alta 5.97 ± 4.1	baja / alta 1.29 ± 2.14 / 4.56 ± 3.39	baja 1.3 ± 0.4	media 2.14 ± 1.7
		distribución en Z	homogénea	poco heterogénea	muy heterogénea	medio heterogénea
	Clorofila < 2µm	concentración (µg/L)	alta 0.84 ± 0.3	bajo / variable 0.6 ± 0.1	bajo / variable 0.5 ± 0.2	bajo / variable 0.7 ± 0.3
distribución en Z		homogénea	heterogénea	heterogénea	heterogénea	
% clorofila > 2µm	concentración	dominante 76.4 ± 24.7 %	no / dominante 47.92 ± 19.65 / 81.21 ± 6.83	dominante 77.13 ± 10.3	dominante 70.8 ± 11.4	
	distribución en Z	homogénea	heterogénea	heterogénea	heterogénea	
% clorofila < 2µm	concentración	no 23.64 ± 22.73 %	dominante / no 52.08 ± 19.65 / 18.79 ± 6.83	no 22.87 ± 10.32	no 29.22 ± 11.40	
	distribución en Z	homogénea	heterogénea	heterogénea	heterogénea	

De la Tabla 26 se puede resumir las características (baja, media, alta y muy alta) de los factores primordiales ambientales que intervienen en la producción de biomasa fitoplanctónica (Tabla 27).

Tabla 27. Luz, nutrientes, suspensión y temperatura características de cada periodo (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía) para el lago Alchichica.

	Circulación	Estratificación Temprana	Estratificación Bien establecida	Estratificación Tardía
Luz	baja	muy alta	alta	media
Nutrientes	alta	baja / media	media	media
Suspensión	alta	baja	media	media
Temperatura	baja	alta	alta	media
Talla dominante	> 2µm	> 2µm / < 2µm	> 2µm	> 2µm

A partir de esta última tabla (Tabla 27) se puede deducir que la dominancia de la talla > 2µm no depende de la luz ni de la temperatura, ya que independientemente de las variaciones en el año de estos dos factores, puede dominar en porcentaje a la biomasa fitoplanctónica. Sin embargo, durante la estratificación temprana cuando esta dominancia puede ser revertida a la talla < 2µm (1998, 1999, 2001), se encuentran siempre condiciones de baja suspensión y en ocasiones de bajos nutrientes (1999, 2001).

Esta relación entre los nutrientes y el cambio de los valores de dominancia de la talla > 2µm en todos los años y periodos se muestra en las siguientes figuras (Fig. 56 y 57). En ellas se puede observar la correlación visual que existe entre el aumento del porcentaje de contribución a la biomasa total de la talla >2µm con el aumento de las concentraciones de NH₄. Esta relación se vuelve a presentar con la correlación significativa de este nutriente y los de la clorofila total, la cual ha sido relacionada con el aumento de contribución de la talla > 2µm (Tabla 28).

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

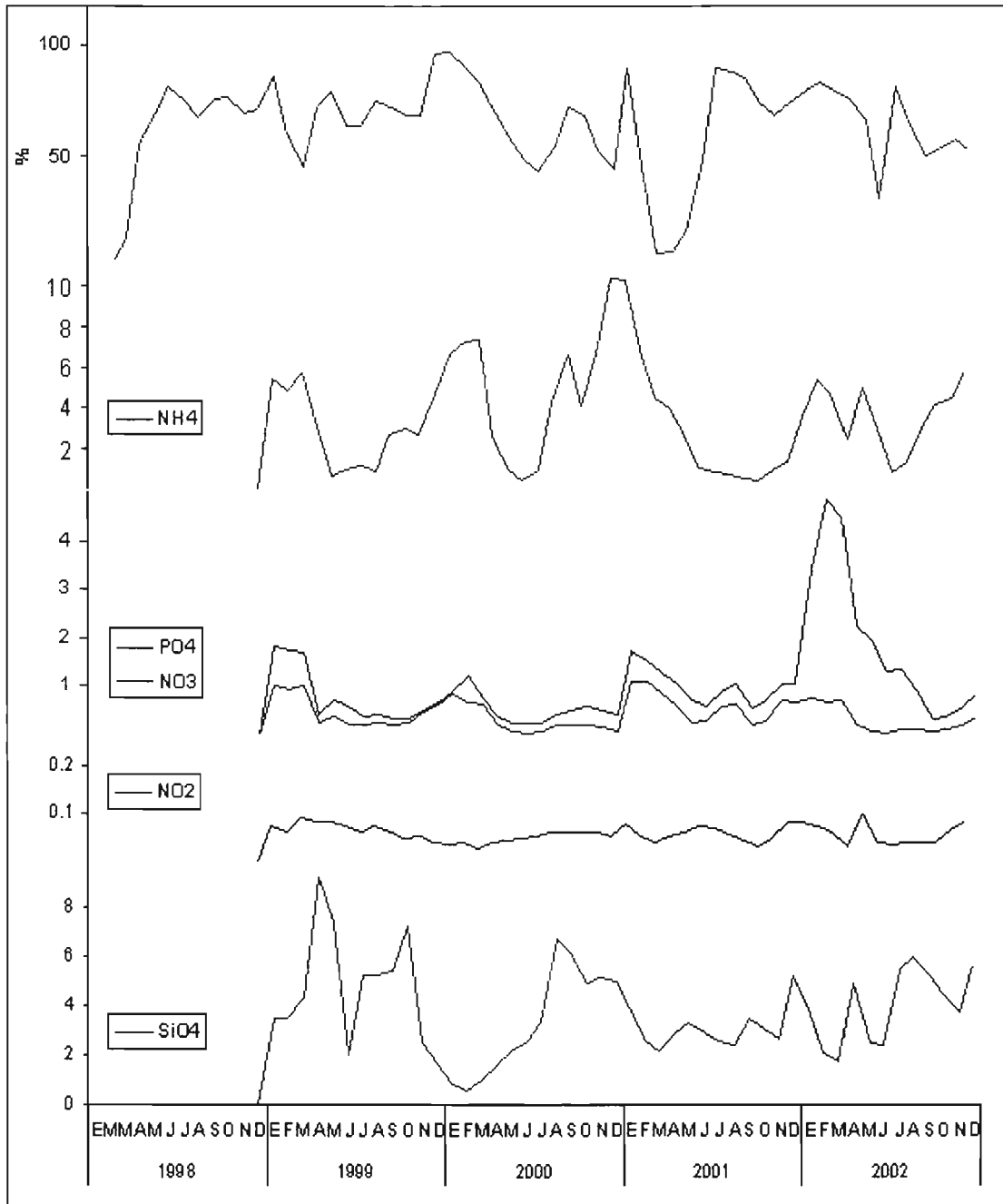


Fig. 56. Nutrientes ($\mu\text{mol/L}$); NH_4 , PO_4 , NO_3 , NO_2 , SiO_4 y su relación con los cambios de porcentaje de aportación a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ (%) en el epilimnion.

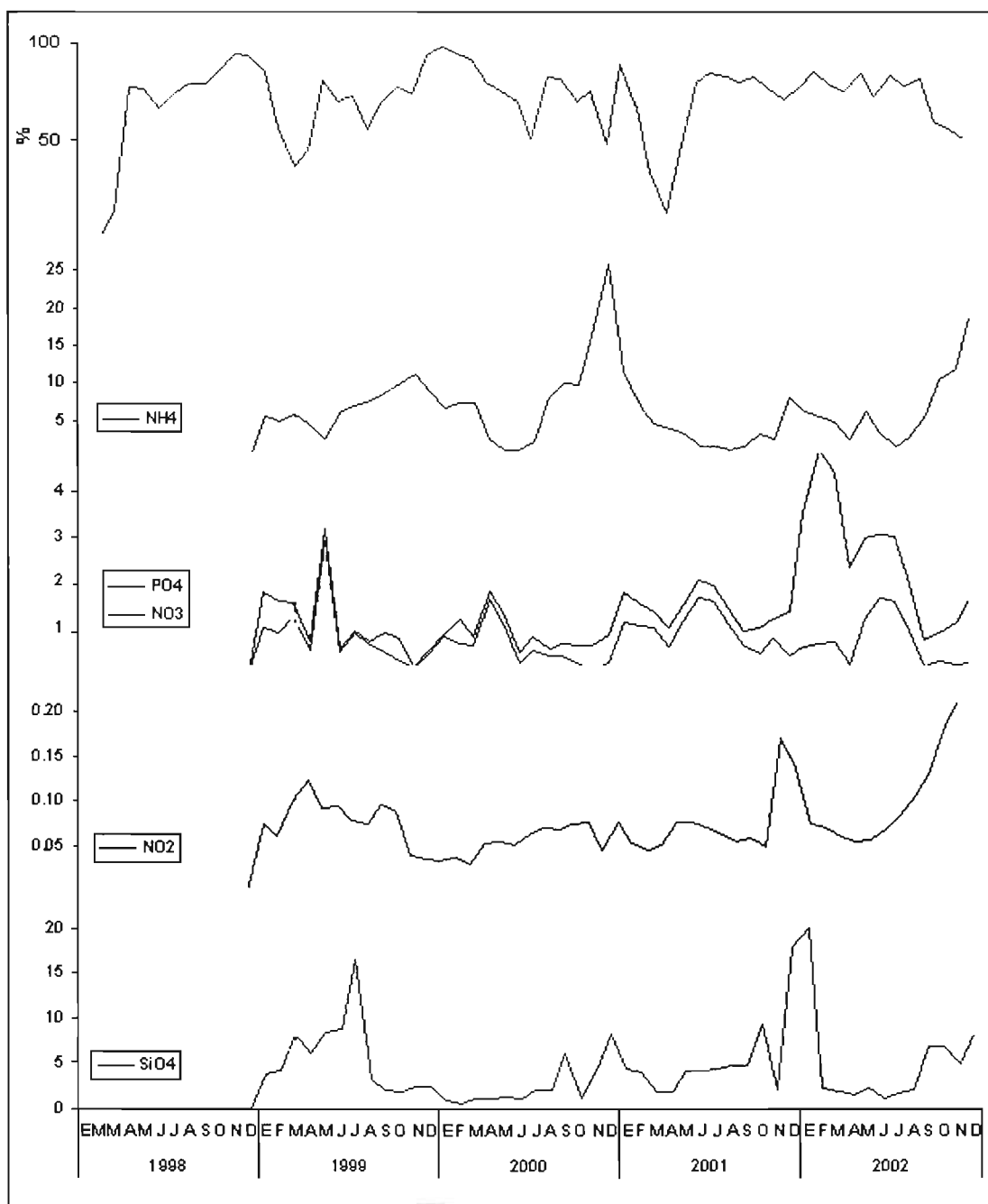


Fig. 57. Nutrientes ($\mu\text{mol/L}$); NH_4 , PO_4 , NO_3 , NO_2 , SiO_4 y su relación con los cambios de porcentaje de aportación a la biomasa total de la talla $> 2\mu\text{m}$ (%) en el metalimnion.

Tabla 28. Regresión múltiple de los valores de clorofila "a" total y nutrientes; NH₄, PO₄, NO₃, NO₂, SiO₄. (*)= significativo, p<0.05; (**)= muy significativo, p<0.01.

	t(74)	nivel p-
Intercepción	3.12	**
NH4	3.54	**
NO2	-1.79	0.08
NO3	2.30	*
PO4	1.91	0.06
SiO4	-2.09	*

Tabla 29. Regresión múltiple de los valores de clorofila "a" correspondiente a la talla > 2µm (A) y < 2µm (B) y nutrientes; NH₄, PO₄, NO₃, NO₂, SiO₄. (*)= significativo, p<0.05; (**)= muy significativo, p<0.01.

A)

Clorofila > 2µm		
	t(74)	nivel p-
Intercepción	2.58	*
NH4	2.96	**
NO2	-1.47	
NO3	2.47	*
PO4	1.31	
SiO4	-2.28	*

B)

Clorofila < 2µm		
	t(74)	nivel p-
Intercepción	3.39	
NH4	2.90	**
NO2	-1.01	
NO3	0.19	
PO4	1.76	
SiO4	-0.17	

VIII DISCUSIÓN

Periodos de oscilación de la clorofila "a" total y fraccionada

El análisis de series de tiempo de la clorofila "a" total integrada mostró como periodos de variación a los siguientes. El periodo más largo encontrado fue el correspondiente a 28.5 meses (Fig. 52), i.e. un periodo aproximadamente bianual. Esta señal representa la alternancia de años observada durante el periodo 1999-2002. Esta alternancia se refiere a lo siguiente.

Los años pares, 2000 y 2002, se comportaron en forma similar en el sentido de que presentaron las mayores concentraciones anuales del periodo muestreado (Figs. 34 y 38), así como que éstas no se circunscribieron al periodo de circulación (Figs. 35, 38C y E, 39), sino que se extendieron a los primeros meses del periodo de estratificación temprana. Esto pudiera estar relacionado en el año 2000 con concentraciones de NH_4 relativamente altas (i.e. 6-8 $\mu\text{mol/L}$; generalmente son < 6 $\mu\text{mg/L}$) que se mantuvieron hasta finales de marzo.

Por otra parte, en relación a la variación vertical, se encontró una diferencia en la uniformidad de la distribución de la clorofila "a" durante el periodo de circulación, ya que estos dos años (2000 y 2002) presentaron una distribución más homogénea.

En contraparte, los años nones, 1999 y 2001, son similares entre sí y diferentes a 2000 y 2002 con relación a sus concentraciones anuales de clorofila "a", las cuales fueron comparativamente menores (Figs. 34, 38B y D). Por otro lado, la distribución de la clorofila "a" en la vertical durante la circulación fue más heterogénea.

Al parecer, también el florecimiento de cianobacterias que se presenta a inicios de la estratificación muestra un patrón aproximadamente bianual, ya que en años en los que se presentan altas concentraciones de biomasa fitoplanctónica durante la circulación que se continúan hasta la estratificación temprana (2000 y 2002), el florecimiento se presenta ya sea de menor intensidad -al compararlo con los años nones (máx. 2.82 $\mu\text{g/L}$ en el año 2000)- o bien retrazado (florecimiento en junio 2002, con valor máx. de 5.73 $\mu\text{g/L}$) (Fig. 38). Esta alternancia tiene sentido ya que durante los años con un florecimiento de cianobacterias fuerte, como fue el de los años 1999 y 2001, hay un aporte extra de nitrógeno al ambiente debido a su sedimentación. Este aporte de nitrógeno favorecerá que durante el invierno (si las condiciones de circulación lo permiten) se genere un florecimiento importante y prolongado de diatomeas como sucedió en los años 2000 y 2002. El aumento de la producción y por tanto de materia orgánica exportada hacia el fondo genera una anoxia que aumenta la desnitrificación y por tanto la pérdida de nitrógeno del sistema, lo cual por un lado desfavorecerá el siguiente florecimiento de diatomeas mientras que, por el otro lado, favorecerá el florecimiento de cianobacterias del próximo. De esta manera se irán alternando años con altos florecimientos de diatomeas (y reducidos de cianobacterias) con años con altos florecimientos de cianobacterias (y reducidos de diatomeas).

Es importante aclarar que esta ciclicidad no pudo ser confirmada a través de las observaciones del presente estudio debido a que no se cuenta con una serie de tiempo más larga; estudios posteriores permitirán confirmar o rectificar esta percepción.

El año 1998 se comportó de forma diferente, sin embargo habría que considerar que el muestreo de este año comenzó en marzo (i.e. no se contó con los muestreos de enero ni de febrero) lo cual subestima el promedio anual y el promedio del periodo de circulación. Las concentraciones de clorofila "a" durante la estratificación fueron las más bajas de los cinco años muestreados y presentaron los valores promedio mínimos de los periodos de estratificación temprana y bien establecida (Figs. 38A y 39, Tabla 11). La concentración del único mes de circulación muestreado fue similar a los años con menor producción, el 1999 y el 2001.

Por otro lado, el año 1998 presentó un florecimiento de cianobacterias entre los 10 y 30 m de profundidad en lugar de ser entre 0 y 12 m como se ha descrito para el mismo lago por otros autores (Oliva *et al.* 2001, Adame 2004) y observado en este estudio (Fig. 38A). De hecho, en otros lagos este florecimiento suele ser superficial como lo menciona Sarvala *et al.* (1999) para el lago Tangañica. Asimismo, no se encontró un DCM pronunciado durante la estratificación bien establecida y se encontró un pico de biomasa fitoplanctónica importante (14.81 µg/L) a los 30 m a finales de la estratificación tardía. Este último pudiera estar relacionado con tormentas inusuales (Fig. 21) que se presentaron durante la estratificación tardía (diciembre), época donde se generó este florecimiento. Estas "anomalías" detectadas al comparar 1998 con los otros cuatro años, podrían estar asociadas con el hecho de que 1998 fue año Niño. La influencia de este fenómeno meteorológico ha sido relacionada con cambios en la producción primaria y en la dominancia de tallas (Iriarte *et al.* 2000) y con la hidrodinámica del Lago Alchichica (aumento en las temperaturas epilimnéticas, un hipolimnion más estrecho y frío y un gradiente térmico más grande en la termoclina) como mencionan Alcocer y Lugo (2003).

La alternancia de años que se encontró con relación a las concentraciones de clorofila "a" total, parece también apreciarse en otras variables. En cuanto al oxígeno disuelto, se observó que los porcentajes de saturación fueron mayores en los años con mayor biomasa fitoplanctónica (2000 y 2002) ($F(1,132) = 4.55$; $p < 0.01$) (Fig. 10 y 11); asimismo, durante el periodo de circulación se presentaron las concentraciones de oxígeno disuelto distribuidas de forma más homogénea en toda la columna de agua. Por otra parte, durante los años 1999 y 2001, años con concentraciones de clorofila "a" menores, se presentaron concentraciones más bajas de oxígeno disuelto durante la circulación y distribuidas de forma menos homogénea (Figs. 10 y 13). Es decir, que a pesar de presentar una columna de agua homeoterma, las concentraciones de oxígeno presentaron un gradiente a partir de los 40-50 m aproximadamente; inclusive en el año 2001, se presentaron condiciones anóxicas en periodo característico de circulación (16 de enero) lo cual sugiere que la mezcla fue incompleta.

Este comportamiento del OD puede explicarse de la siguiente forma. Durante la circulación de los años con alta concentración de clorofila "a" se producen altas cantidades de fitoplancton que al iniciar la estratificación se sedimentan aportando una gran cantidad materia orgánica al hipolimnion la cual es oxidada en el fondo generando condiciones anóxicas en forma temprana (i.e. 27 de abril y 24 de marzo en 2000 y 2002, respectivamente). En contraste, los años pares con una menor producción de fitoplancton, la anoxia da inicio tardíamente en forma comparativa (19 de mayo, 1° de junio y 5 de mayo en 1998, 1999 y 2001, respectivamente). Esta hipótesis se sustenta en el hecho de encontrar picos importantes de biomasa fitoplanctónica hipolimnéticas durante la estratificación temprana de los años con alta producción (Fig. 38, Tabla 11).

La oxidación de la materia orgánica sedimentada produce un déficit de oxígeno en el fondo del lago, fenómeno acelerado por las temperaturas altas del hipolimnion de los lagos tropicales (Lewis 1996), $\geq 14^{\circ}\text{C}$ en el lago Alchichica. Este déficit de oxígeno podrá ser compensado durante el siguiente periodo de circulación siempre y cuando la mezcla no sea incompleta y/o la cantidad de materia orgánica a oxidar sobrepase la capacidad del sistema, dando como resultado un gradiente de oxígeno durante la circulación con condiciones de hipóxicas a anóxicas en las capas profundas del lago.

Las concentraciones significativamente más altas de NH_4 durante la estratificación tardía de 2000 y 2002 que son liberadas a toda la columna de agua con posterioridad, sugieren fuertemente la existencia de una alta cantidad de materia orgánica sedimentada cuya oxidación conduce a condiciones de fuerte anoxia. Otro resultado de este déficit de oxígeno en el fondo se relaciona también con el NO_3 . Al agotarse el oxígeno, la materia orgánica produce NH_4 vía reducción del NO_3 (Figs. NH_4 y NO_3 , Sánchez, 2005) y también una salida de N_2 vía desnitrificación lo que disminuye la disponibilidad del nitrógeno para el siguiente periodo de mezcla.

Con relación a la heterogeneidad en la distribución vertical durante los periodos de circulación de los años 1999 y 2001, se encontraron los valores más altos de heterogeneidad -expresado como el porcentaje de la desviación estándar con relación a la media- del PO_4 . De igual forma, el año 2001 presentó los valores más altos de heterogeneidad en la columna de agua del resto de los nutrientes (p.e., SiO_4 y en menor porcentaje el NO_3) (Tabla 7).

La heterogeneidad de la distribución de los nutrientes en la columna de agua durante la circulación de los años 1999 (PO_4) y 2001 (NO_3 , NH_4 , PO_4 y SiO_4) pudiera estar relacionada con la distribución del OD descrita anteriormente. El oxígeno es fundamental en la remineralización de los nutrientes, forma en la cual pueden ser utilizados como nutrientes por el fitoplancton. En estos periodos en los cuales se presentan porcentajes bajos de saturación del OD (1999) e inclusive, una ausencia del mismo en las capas profundas (2001) (Fig. 10), hay una menor liberación de nutrientes en la columna de agua lo que puede estar provocando una baja producción de diatomeas y por ende concentraciones de clorofila "a" más bajas (Figs. 38 y 39).

Con todo lo explicado anteriormente, se puede especular que en el periodo muestreado en el Lago Alchichica, existieron años en los cuales los procesos biogeoquímicos (oxidación de compuestos) dominaron sobre la mezcla dando como resultado una columna menos homogénea con relación a las variables medidas (clorofila "a", OD, nutrientes) (1999 y 2001), alternados con años en los que los procesos biogeoquímicos dominaron sobre la mezcla (2000 y 2002) provocando una distribución más homogénea.

El patrón bianual sugerido por el análisis de series de tiempo probablemente es resultado de la alternancia de estos dos tipos de años observados durante el periodo estudiado, los cuales son resultado de a) un forzamiento externo que define la intensidad de la circulación de la columna de agua, (i.e., el clima) y b) un control interno de la producción de la circulación (i.e., la dependencia de la producción de un año con relación al anterior).

En el primer caso, el forzamiento externo se refiere particularmente a la temperatura del invierno durante la circulación; las bajas temperaturas pueden hacer que la circulación sea más intensa (Salmaso 2005), esto es, que exista una mejor homogeneización de la columna de agua, lo cual implicaría una mejor distribución de los nutrientes en la columna de agua y una mayor biomasa fitoplanctónica. De ahí que el año 2000 que fue año Niña, presentó las temperaturas más bajas detectadas (Tabla 2, Fig. 4) (promedio anual = $15.71 \pm 1.56^{\circ}\text{C}$), en particular durante la circulación (Tabla 3) ($14.26 \pm 0.27^{\circ}\text{C}$) y asociado a ello una columna de agua homogénea, alta disponibilidad de N y Si (ver Sánchez, 2005, Figs. SiO_4 y N:P) y una alta concentración de biomasa fitoplanctónica. Adicionalmente, los años 2000 y 2002 presentaron una menor estabilidad de la columna de agua (Fig. 15), lo cual es también un indicador de una circulación más intensa.

Estas observaciones hacen posible especular acerca de la relevancia de la importancia de la alternancia de los años Niño (más cálidos como 1998) con los años Niña (más fríos como 2000) y sus efectos sobre el lago Alchichica. Este último tipo de años, como fue el año 2000, pudieran ser los desencadenadores de los eventos de alternancia de años (pares y nones o bien Tipo 1 y Tipo 2) que se encontraron en los años posteriores, ya que al generar un mayor enfriamiento invernal y por lo tanto una mayor intensidad de la mezcla durante el periodo de circulación del invierno 1999-2000, ocasionan un aumento importante en las concentraciones de biomasa fitoplanctónica durante la circulación lo cual genera un efecto en cadena que termina en una alternancia de años con alta producción con otros de baja producción como se explicó anteriormente. Es probable que este efecto se disminuya con el tiempo y se "ajuste" a un periodo anual hasta que otro agente desencadenante de este efecto –otro año frío o año Niña- vuelva a establecer una periodicidad bianual. Esta influencia del fenómeno de El Niño-La Niña que resulta en periodos de 2-7 años ha sido mencionada para el lago Chapala en México (Tereshchenko *et al.* 2002) así como en periodos de 2-3 años en un estudio a largo plazo (1903-1985) (Richey *et al.* 1989 mencionado por Talling y Lemoalle 1998) realizado sobre las descargas del Río Amazonas.

Por otra parte, resulta interesante que periodos similares, de tipo cuasi-biaual se han encontrado el Pacífico Norte (Ware 1995 citado por Lluch *et al.* 2003) y en el Golfo de California, México (Lluch *et al.* 2003). Periodos que podrían estar afectando a las aguas epicontinentales como es el lago Alchichica.

Con relación al segundo caso, el control interno de la producción puede estar definido en gran parte por el nutriente limitante de la producción durante el periodo de circulación, el cual parece ser la disponibilidad de silicatos (Tabla 28, $t(74) = -2.09$; $p > 0.05$). El florecimiento invernal que se presenta durante la circulación del Lago Alchichica está compuesto principalmente por diatomeas de gran tamaño (Oliva *et al.* 2001); cuando éste se presentó de forma particularmente intensa (2000 y 2002), los silicatos fueron prácticamente eliminados de la columna de agua (Sánchez 2005) y seguramente exportados al fondo del lago en forma de frústulas donde es remineralizado. Si existe una alta acumulación de este nutrimento en el fondo del lago, aunado a las condiciones anóxicas más intensas durante estos años y a las tasas relativamente bajas de remineralización de los silicatos, es probable que la remineralización de este nutrimento al año siguiente no haya sido completa dando como resultado menores concentraciones de silicatos disponibles durante el siguiente periodo de circulación (2001) lo cual limitaría la producción. Al siguiente año, debido a un menor aporte de materia orgánica al fondo y por ende una anoxia menos intensa, la remineralización de los silicatos se completaría y favorecería un florecimiento intenso de diatomeas durante el siguiente periodo de circulación.

Estudios como el de Stronge (1998) y Berman (1995) apoyan esta explicación sobre la alternancia de años aquí propuesta. Ellos afirman que la concentración de clorofila puede estar relacionada con la concentración del año o estación anterior, es decir, es posible que esta dependencia o control interno de la producción de un año con relación al anterior de como resultado un año con alta producción seguida de otro con baja. Asimismo, Salmaso (2005) sugiere que la producción durante la circulación es clave para determinar la producción del resto del año ya que éste periodo determinará la fracción de nutrientes que serán reciclados de las aguas profundas a la superficie del lago.

Otros periodos de variación más largos a un año como el encontrado para el Lago Alchichica han sido registrados en otros lagos tropicales Talling (1986b) como el Lago Nakuru (Kenya) con periodos relacionados con la salinidad, el Lago Chad asociados a épocas de sequía y los lagos Elmenteita y Hannington en Kenia, cuyos periodos mayores a un año reflejan cambios en salinidad, abundancia de zooplancton y dinámicas de nutrientes. En este mismo artículo el autor sugiere la probabilidad de que los periodos estacionales puedan estar subordinados a aquellos con periodos más largos o interanuales. Por otra parte, Jassdy *et al.* (1992) detectaron un periodo de tres años en el lago Tahoe en California-Nevada. Este periodo no tiene una explicación aparente y se lo atribuyen a dos posibles causas: a una interacción con un depredador con una misma periodicidad o a la propia interacción entre el fitoplancton y los nutrientes limitantes.

En resumen, el control externo y el interno presentes en el Lago Alchichica dieron como resultado dos "tipos" de "años" durante el periodo muestreado que se presentaron de forma alternada. Durante la circulación de los años "Tipo 1" (2000, 2002) se presentan altas concentraciones de OD y nutrientes (en especial de SiO_4) en la columna de agua y biomasa fitoplanctónica elevada, todos ellos distribuidos de forma homogénea en la columna de agua. Posteriormente, durante la estratificación temprana, se generan picos hipolimnéticos de clorofila "a" derivados de la sedimentación del fitoplancton producido. La elevada cantidad de materia orgánica generada en el periodo de circulación y sedimentada posteriormente provoca una anoxia temprana, lo que da lugar a altas concentraciones del NH_4 durante la estratificación tardía y a una intensificación de la pérdida de nitrógeno debido a una alta desnitrificación, así como a un déficit de oxígeno importante. Al dar inicio la circulación del siguiente año, este déficit no es compensado en su totalidad y la remineralización de los nutrientes (particularmente SiO_4) no es completa lo que da lugar al año "Tipo 2".

Durante la circulación del año "Tipo 2" (1999, 2001) se presenta un gradiente de OD y nutrientes en la columna de agua, así como una deficiencia de SiO_4 y N, lo que da lugar a una menor producción de biomasa fitoplanctónica, la cual se distribuye de forma heterogénea. Durante la estratificación temprana se encuentran concentraciones bajas de clorofila "a". Durante la circulación del siguiente año, debido a que no existió una anoxia temprana y a que el aporte de materia orgánica fue menor al del año anterior, el déficit de OD no es tan grande, el silicato ha sido remineralizado por completo y se generan las condiciones correspondiente al año "Tipo 1". De esta manera los años "Tipo 1" y "Tipo 2" se van alternando.

Es importante recalcar que el periodo de muestreo en este estudio es una "ventana" temporal muy pequeña para realizar especulaciones mayores por lo que la variación bianual aunque en un primer análisis muestra consistencia, pudiera no ser representativa de la variación del Lago Alchichica a más largo plazo. Entre las condiciones que podrían interferir con la permanencia de oscilaciones bianuales en el sistema está el hecho de que la periodicidad del principal forzamiento externo aquí discutido, el incremento en la circulación durante los años "Niña" con mayor enfriamiento invernal tiene una periodicidad altamente variable en el lapso de 4-7 años, con lo cual, así como en el 2000 produjo un impulso en la oscilación bianual, en otras ocasiones podría constituirse en una interferencia destructora (fuera de fase) con dicha periodicidad.

La primera hipótesis (*El periodo más importante de variación de la clorofila "a" total es el anual determinado por la dinámica de circulación y estratificación del lago*) es parcialmente aceptada, ya que en el análisis espectral, el periodo bianual tuvo una importancia similar y que aquí se han presentado tanto evidencia de las oscilaciones en este periodo como los posibles mecanismos causantes de dichas oscilaciones.

Siguiendo con el análisis de series de tiempo, se observa que el segundo periodo es el anual, esto es, el correspondiente al pico de 11.4 y 14.2 meses (Fig. 52). El periodo anual en el que se presentan concentraciones altas de biomasa

fitoplanctónica en la circulación y que disminuyen en la estratificación ha sido descrito previamente (e.g., Emiliani *et al.* 1974, Hecky y Kling 1981, Warwick 1983), ya que es el patrón que caracteriza a los lagos monomícticos. En ellos, la liberación de nutrientes del hipolimnion aunado a un aumento en la turbulencia de la columna de agua durante el período de circulación del lago dan como resultado las máximas concentraciones de biomasa fitoplanctónica del año. Posteriormente, durante la estratificación, con el establecimiento de una termoclina las concentraciones de fitoplancton disminuyen debido a la baja en la concentración de nutrientes (Figs. 38 y 39).

El patrón anual ha sido descrito a detalle para el lago Alchichica por varios autores como Sánchez (2000), Alcocer *et al.* (2001) y Adame (2004). Por otra parte, esta ciclicidad anual se ha encontrado en otros lagos tropicales como el, Tangañica en África (Hecky y Kling 1981) y subtropicales como el Kinneret, Israel (Pollinger 1986). Esta estacionalidad concuerda con la opinión de Lewis (1996) y Talling (1986) de que es posible encontrar una estacionalidad marcada en los trópicos que puede deberse a las estaciones climáticas o hidrodinámicas del lago.

Por otra parte, esta anualidad puede ser relacionada con factores ambientales; en primer lugar con la Z_{EU} . En el lago Alchichica ésta presentó una variación anual permitiendo reconocer una fase de agua turbia durante la circulación y una fase de agua clara durante la estratificación según se menciona en el modelo PEG (Sommer *et al.* 1986) (Fig. 8).

Por otra parte, la temperatura también exhibe una periodicidad anual presentando sus valores máximos durante la estratificación bien establecida y los mínimos en la circulación. Sin embargo, el efecto más importante de este parámetro es su relación con los eventos de circulación y estratificación del lago. En los cinco años el lago comenzó a circular en enero y terminó a finales de marzo o principios de abril y permaneció estratificado el resto del año (Figs. 5 y 7). Este mismo patrón anual lo presenta la concentración de clorofila "a", lo cual coincide con la idea de Talling (1986), Kalff y Watson (1986) y Lewis (1996), de que algunos lagos tropicales pueden mostrar periodicidad.

Este efecto de la temperatura tiene implicaciones en la suspensión del fitoplancton debido a la formación/destrucción de la termoclina. La termoclina estuvo relacionada, evidentemente, con la estabilidad de la columna de agua y como era de esperarse, las mayores estabilidades se encontraron durante la estratificación bien establecida y menores durante la circulación (Figs. 14 y 15). Estas dos condiciones (circulación y formación de una termoclina) favorecen la suspensión de biomasa fitoplanctónica, en el primer caso, sosteniendo a las células por turbulencia durante la circulación y en el segundo caso debido a que existe una diferencia de densidad importante en el metalimnion (termoclina/picnoclina), promoviendo la formación del DCM. De esta manera, las concentraciones más elevadas de clorofila "a" se presentan durante la circulación favorecidas por la turbulencia; por otro lado, durante la estratificación, las concentraciones más altas en el perfil vertical se presentan asociadas al DCM.

Las variaciones en la concentración de nutrientes, como era de esperarse al ser un lago monomítico y como ha sido ampliamente descrito (e.g. Warwick *et al.* 1983, Wood *et al.* 1984), fueron principalmente anuales, con sus valores máximos y una distribución vertical en toda la columna de agua durante la circulación y una disminución de su disponibilidad en la Z_{EU} durante la estratificación, al mismo tiempo que su acumulación en el hipolimnion.

A continuación, se puede observar en las series de tiempo periodos semestrales (6.3 y 5.7 meses) que parecen corresponder al ciclo de seis meses entre los picos de concentración de clorofila "a" presentes durante la circulación y la formación del DCM, (i.e. entre la circulación y estratificación bien establecida del lago). El DCM es típico de lagos oligotróficos que poseen una Z_{EU} que alcanza al metalimnion en donde se acumulan células fitoplanctónicas (Gervais *et al.* 1997). Adicionalmente, en esta zona se encuentran nutrientes suficientes que permiten el desarrollo fitoplanctónico debido a los pulsos -de nutrientes- provocados por fenómenos como las ondas internas las cuales serán explicadas más adelante y a la remineralización *in situ* de la materia orgánica.

Finalmente, se encuentra un periodo de 4.1 meses el cual probablemente representa el ciclo formado por circulación-floreCIMIENTO de cianobacterias-pulsos durante estratificación tardía (e.g., diciembre 1998)-circulación. Como se puede observar, estos dos periodos (semestral y de cuatro meses) están a su vez relacionados con los periodos en los cuales se subdividió a la estratificación (estratificación temprana, bien establecida y tardía). Al observar las variaciones entre estos periodos en cuanto a todas las variables medidas, se puede sugerir que la subdivisión de la estratificación es representativa de periodos naturales del lago y no de una clasificación artificial o arbitraria.

Es importante agregar que en lagos tropicales existe una mayor predisposición a oscilaciones irregulares debido a una amplitud reducida en la cantidad de radiación solar a la que están expuestos y a la temperatura (Talling 1998), lo cual podría explicar algunas de las variaciones aquí expuestas.

Con base en lo anterior, se acepta la hipótesis 6 (*Las variables ambientales que favorezcan condiciones de "suspensión" y una relativa alta concentración de nutrientes serán las que expliquen en mayor grado, las variaciones en la concentración de biomasa*), ya que los pulsos más importantes de la clorofila "a" (floreCIMIENTO invernal, DCM) se presentaron en ambientes con capacidad de suspensión, ya sea por turbulencia (circulación) o por la existencia de una termoclina (estratificación bien establecida) y con disponibilidad de nutrientes. En el caso específico de las cianobacterias, la conjunción de variables que les permiten dominar en un momento específico (inicio de la estratificación, aumento de estabilidad, temperatura del agua y luz en aumento así como deficiencia de nitrógeno) se da por un corto periodo de tiempo, durante el cual su capacidad de flotación así como la de fijar nitrógeno directamente de la atmósfera les permite crecer en forma explosiva.

Los periodos de variación de la fracción de talla del fitoplancton $> 2\mu\text{m}$ (nano y microfitoplancton) (Fig. 53), fueron muy parecidos a los de la clorofila total (Figs. 38 y 40).

Con relación a la distribución espacial (en la vertical), la diferencia de esta talla con la del fitoplancton total fue que su distribución en la columna de agua durante la estratificación no fue significativa, lo cual a primera vista resulta extraño ya que su distribución es preferencialmente metalimnética. Sin embargo, la respuesta está en la presencia del florecimiento anual de cianobacterias ($> 2\mu\text{m}$) que es primordialmente epilimnético, así como los máximos hipolimnéticos presentes durante la estratificación temprana de los años 2000 y 2002 (Fig. 39). Los máximos hipolimnéticos registrados son resultado de la sedimentación del fitoplancton de talla grande después del periodo de circulación. Este fenómeno lo describe Reynolds (1988) e indica que el establecimiento de la estratificación que disminuye o acaba con la capa de mezcla y el aumento de la radiación solar tienen como resultado el hundimiento de las tallas grandes (en este caso principalmente diatomeas) con poca tolerancia a la insolación, éstas “escapan” al fondo del lago antes de ser dañadas excesivamente; estos inóculos estarán disponibles para la siguiente temporada de mezcla.

Dicho lo anterior, se acepta la segunda hipótesis (*Los periodos de variación de la clorofila “a” $> 2\mu\text{m}$ son similares a aquellos de la clorofila “a” total debido a que esta talla es la dominante la mayor parte del año*).

Los periodos de cambio de la biomasa del fitoplancton de talla $< 2\mu\text{m}$ (Fig. 54), presentaron dos grandes diferencias con los correspondientes a la biomasa total y a la talla $> 2\mu\text{m}$, consistentes en la ausencia del ciclo bianual y la presencia de un ciclo de un año y medio aproximadamente (19.1 meses). Esta ciclicidad, aunque es difícil de explicar, resulta importante ya que demuestra que el comportamiento de la biomasa $< 2\mu\text{m}$ es diferente al de la talla $> 2\mu\text{m}$ y a la total. La señal más fuerte que presentó esta talla fue la variación anual (11.4 meses) correspondiente al ciclo hidrodinámico (estratificación/circulación) del lago. Finalmente, se vuelven a presentar los ciclos de medio año (5.7 y 5.4) y de tercio de año (3.6, 4.1), los cuales nuevamente representan incrementos asociados al periodo semestral comprendido por el ciclo circulación-DCM y al de 4 meses que representa el ciclo formado por circulación-florecimiento de cianobacterias-pulsos durante estratificación tardía-circulación, fenómenos en los cuales la biomasa general del fitoplancton aumenta y a la cual la talla de fitoplancton $< 2\mu\text{m}$ también aporta, aunque en menor proporción que la talla $> 2\mu\text{m}$.

La talla correspondiente al picofitoplancton no presentó variaciones significativas entre los cinco años muestreados, sólo se observó un ligero aumento (23.9%) en el 2002 (Fig. 42). Este hecho concuerda con las observaciones de Frenette *et al.* (1994) que establecen que esta talla tiende a permanecer relativamente constante en el tiempo. Otro resultado que concuerda con esta afirmación es que los rangos de variación ($5.13\text{-}141.09\text{ mg/m}^2$) (Fig. 44) de esta talla no fueron tan grandes como los de la talla $> 2\mu\text{m}$ ($13.71\text{-}820.52\text{ mg/m}^2$) (Fig. 41).

Lo anterior no indica que no se encontraran variaciones importantes en la concentración de esta talla, tal y como lo demuestran las amplias desviaciones estándar calculadas, así como los periodos (mayores a un año, anuales, de medio año y de tercio de año) reconocidos a través del análisis de series de tiempo.

Por otra parte, la talla de fitoplancton $< 2\mu\text{m}$ presentó una variación muy significativa tanto entre periodo como entre periodo/año. El comportamiento general de la biomasa de esta talla de fitoplancton presentó un patrón general con valores máximos durante el periodo de circulación y una tendencia a disminuir en la estratificación. Sin embargo, en algunos años los valores máximos se presentaron durante la estratificación temprana (2001) o bien establecida (1999) o tardía (2002). Esta variación implica que aunque esta talla está relacionada con la hidrodinámica del lago (periodos de circulación y estratificación) (Fig. 43 y 44), su producción es menos dependiente de estos eventos en comparación con la de la talla $> 2\mu\text{m}$.

Con base en esta información se puede aceptar parcialmente la tercera hipótesis (*Los periodos de variación de la fracción de clorofila "a" $< 2\mu\text{m}$ no son variaciones periódicas regulares, manteniéndose comparativamente constante*), ya que aunque existió una constancia en la biomasa fitoplanctónica de esta talla entre los años, presentó fluctuaciones estacionales.

Finalmente y a diferencia de la talla $> 2\mu\text{m}$, la talla de fitoplancton $< 2\mu\text{m}$ presentó diferencias significativas entre estrato de la columna de agua con sus mayores concentraciones en el metalimnion seguidos de cerca por las del epilimnion (Fig. 42). Esta distribución es esperada debido a que esta talla presenta mecanismos que disminuyen su tasa de sedimentación (Talling y Lemoalle 1998) y capacidades de fotoadaptación (Frenette *et al.* 1996); además, esta talla tiende a ser consumida o degradada más rápidamente y por lo tanto rara vez se exporta por debajo de la termoclina fuera de la Z_{EU} (Legendre 1999).

Contribución porcentual de las fracciones de talla de fitoplancton a la biomasa total.

Como se había mencionado con anterioridad, la mayor contribución a la biomasa fitoplanctónica total fue la talla $> 2\mu\text{m}$ con un promedio en los cinco años de $70.83 \pm 2.02\%$ (Tabla 19). La dominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$ en lagos oligotróficos tropicales sólo había sido registrada para este mismo lago (i.e. Sánchez 2000; Adame 2004). Otros caso es el lago templado oligotrófico de alta montaña Mountain Lake, Virginia, EU (Beaty y Parker, 1995).

El porcentaje de aportación a la biomasa fitoplanctónica de la talla grande presentó variaciones tanto espaciales como temporales. La diferencia entre los estratos del lago (epi-,meta- e hipolimnion) con el porcentaje de dominancia aumentando con la profundidad, es decir, con porcentajes máximos en el hipolimnion (especialmente en la estratificación bien establecida) y mínimos en el epilimnion (especialmente en la estratificación temprana) (Figs. 45 y 47, Tabla 20) puede explicarse con el hecho de que la talla $< 2\mu\text{m}$ se encuentra principalmente

en las capas superiores del lago debido a su capacidad de flotabilidad, baja sedimentación y reciclamiento en la capa de mezcla.

Por otra parte, en relación a la variación temporal se puede observar que las mayores aportaciones de la talla $> 2\mu\text{m}$ se presentaron durante los periodos de circulación, particularmente en los años 2000 y 2002, así como en la estratificación tardía del año 1999 (Fig. 45)

Durante los años 1998, 1999 y 2001 hubo breves periodos de dominancia de la talla $< 2\mu\text{m}$ durante la estratificación temprana, único periodo en el cual esta talla llegó a dominar. Sin embargo, esta dominancia no se presentó en los años 2000 y 2002 (Fig. 48).

Como se discutió anteriormente, cuando existe una alta producción durante la circulación que se extiende a los primeros meses de la estratificación temprana (como ocurrió en 2000 y 2002), la talla $< 2\mu\text{m}$ no domina en ese periodo del año ni muy probablemente durante el resto del año. En contraparte, cuando la producción durante la circulación es menor y disminuye durante la estratificación temprana, la talla $< 2\mu\text{m}$ domina en este último periodo. En los años que domina la talla $< 2\mu\text{m}$ durante la estratificación temprana (1998, 1999, 2001) su contribución tiende a disminuir a lo largo del año; por el contrario, durante años donde esta dominancia no existe (2000 y 2002), su contribución tiende a aumentar lo largo del año (Fig. 48). Esta alternancia de años, apoya la existencia de una bianualidad, tal como fue encontrado para la clorofila "a" en el periodo 1999-2002, lo cual explica la frecuencia de 19 meses (Fig. 55) encontrada para los porcentajes de aportación de la talla $> 2\mu\text{m}$, ya que entre la estratificación temprana de un año y la estratificación tardía del siguiente, existe un periodo de aproximadamente 19 meses.

Por lo anterior y con relación a la séptima hipótesis (*Durante los cinco ciclos anuales, la dominancia de la talla pequeña se restringirá a la estratificación temprana, el resto del año dominará la talla grande*) se acepta parcialmente, afirmando que al parecer, este patrón se presentó de forma aproximadamente bianual.

Adicionalmente, se puede observar que las altas contribuciones en porcentaje de la biomasa fitoplanctónica de la talla $> 2\mu\text{m}$ están relacionadas con los valores máximos de producción de biomasa fitoplanctónica total (Fig. 51). Esta relación ya ha sido descrita por Agawin *et al.* (1999) quienes concluyen que el picofitoplancton suele dominar en aguas oligotróficas debido a su capacidad de absorber nutrientes en baja cantidades y que al aumentar la biomasa total, ésta talla no crece tan rápido como las tallas grandes, lo que ocasiona una disminución de su aportación a la biomasa total y un aumento del porcentaje de aportación de las tallas grandes.

Control ambiental de las variaciones de la dominancia de talla de fitoplancton

Los factores ambientales considerados comprenden las variaciones climáticas, hidrodinámicas y químicas que afectan la producción primaria de un lago y en última instancia, la fracción de talla de fitoplancton dominante.

La razón de la dominancia de la talla grande durante la circulación es clara y está asociada a la elevada turbulencia (Malone y Chervin 1979; Tremblay 1997; Waite y Thompson 1992; Wetzel 2001) y las elevadas concentraciones de nutrientes (Lafond *et al.* 1990; Frenette *et al.* 1994; Agawin *et al.* 1999).

Durante la estratificación temprana, la talla $< 2\mu\text{m}$ suele dominar (Fig. 48) lo que puede explicarse, de acuerdo a Agawin *et al.* (1999), con el aumento en la temperatura del agua y a la disminución en la concentración de nutrientes y de turbulencia. Para el Lago Alchichica, este es el periodo cuando se presentan los valores máximos de la temperatura del aire (Fig. 17 y 18), evaporación (Fig. 25), energía solar (Fig. 27) e radiación solar, características que favorecen las altas temperaturas del agua presentes en este periodo. Por otra parte, no existe un agente capaz de sostener a las células grandes en la columna de agua ya que la turbulencia ha disminuido y aún no se ha desarrollado una termoclina bien definida con la consecuente presencia de una pycnoclina. La combinación anterior favorece a las tallas chicas las cuales poseen bajas tasas de sedimentación.

Durante la estratificación bien establecida se plantean dos hipótesis para explicar esta "contradictoria" dominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$, la primera para el epilimnion y la segunda para el metalimnion.

La primera hipótesis consiste en la presencia de fuertes fluctuaciones en la Z_{MIX} . Estas fluctuaciones (i.e. atelomixis) en el lago Alchichica no se presentaron de forma similar a las que se han encontrado en otros lagos tropicales (Lewis 1996). La Z_{MIX} en el lago Alchichica presentó fluctuaciones esporádicas de profundidad de aproximadamente 5 m (Fig. 12). Este patrón tampoco se asemeja a aquel de lagos templados, en los cuales, al irse acercando la estratificación, existe una continua disminución de la Z_{MIX} para luego profundizarse una vez más al acercarse a la siguiente circulación. Sin embargo, es posible que existan fluctuaciones recurrentes y pronunciadas en la Z_{MIX} en el lago Alchichica pero que no hayan sido detectadas debido a la gran separación temporal entre los muestreos. Monitoreos continuos (cada 5 min.) recientes que se han venido realizando en el lago (J. Alcocer, com. pers. Fig. 58) muestran a una termoclina mucho más dinámica de la percibida con muestreos mensuales. Un análisis a detalle de estos datos seguramente darán luz a este respecto. Otro apoyo para la sugerencia de atelomixis, son las disminuciones de la Z_{EU} que se presentan a lo largo de la estratificación, en específico durante la estratificación bien establecida de los años 2000 y 2001 (Fig. 8) lo que sugiere episodios de mezcla parcial con pulsos de nutrientes y consecuentemente, de biomasa fitoplanctónica.

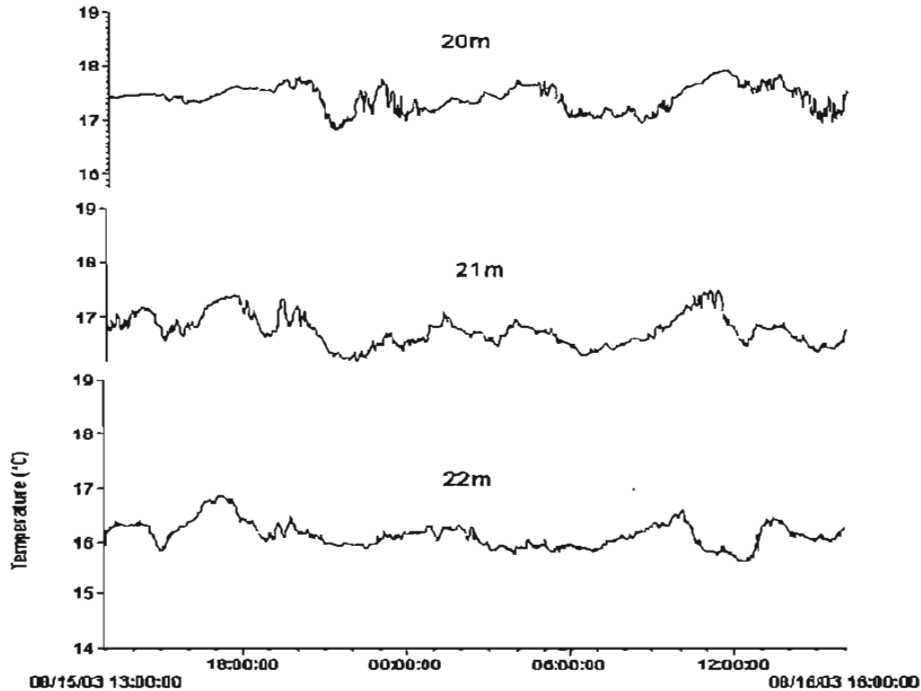


Fig. 58. Temperatura registrada en el metalimnion durante la estratificación bien establecida (8 agosto) del 2004 (Alcocer).

También existen factores meteorológicos, especialmente el viento asociado a bajas temperaturas, que pueden afectar la estabilidad de la columna de agua permitiendo la presencia de atelomixis (Lewis 1973), fenómeno reconocido y característico de lagos tropicales donde la estratificación es fácilmente desestabilizada y la fuerza de Coriolis no reduce la velocidad del viento (Lewis 1996).

En el lago Alchichica se registraron vientos fuertes que se mantienen durante todo el año con valores promedio de alrededor de 2 m/s (7.2 km/h) (Fig. 32). Por otra parte, se puede observar que es durante la estratificación bien establecida donde se encuentra las temperaturas máximas del agua (hasta 21°C en el epilimnion) con una mayor variación, fenómeno que se atribuye a la pérdida de calor que se produce por enfriamientos repentinos del aire producido por estas lluvias y que va acompañado de una desestabilización de la termoclina (Lewis 1973).

Adicionalmente, las lluvias y tormentas se llevan a cabo durante la época correspondiente al periodo de estratificación bien establecida del lago (Fig. 20, 21, 22 y 28). Estos fenómeno meteorológicos, (junto con el viento), han sido reconocidos como factores que acentúan la termoclina y ensanchan el epilimnion (Lewis 1972). Esto puede ser observado en los perfiles de temperatura y OD durante la estratificación bien establecida donde se muestra una termoclina pronunciada y una profundidad del epilimnion que alcanza los 15-20m y que se va ensanchando conforme avanza el periodo.

La precipitación pluvial es un factor que puede aportar nutrientes debido a las partículas terrígenas presentes en la atmósfera y que son incorporadas al lago y en parte a los deslaves que provocan en la cuenca. Este factor es de gran importancia ya que es una de las grandes diferencias entre los lagos tropicales y templados, ya que éstos últimos no presentan una época de lluvias durante su periodo de máxima estratificación. Esto podría ser un factor importante por el cual durante este periodo se favorezca a la presencia de tallas de fitoplancton $> 2\mu\text{m}$.

Un ejemplo registrado de la influencia del posible efecto de las lluvias sobre el crecimiento fitoplanctónico puede encontrarse en diciembre del año 1998 donde se registró una fuerte tormenta (superior a lo encontrado para otros años) (Fig. 21) concordando con un aumento importante en las concentraciones de clorofila "a" (de valores $< 1 \mu\text{g/L}$ a mediados de octubre a un máximo de $14.8 \mu\text{g/L}$ a principios de diciembre). Cabe aclarar que este florecimiento puede también deberse o ser promovido a que durante este periodo ocurren liberaciones de nutrientes por profundización de la termoclina y la tormenta pudo haber acelerado este proceso.

La segunda hipótesis tiene que ver con la presencia de ondas internas. Filonov y Alcocer (2002) describieron la presencia de importantes ondas internas en el lago Alchichica; estos eventos han sido relacionados con la presencia de turbulencia en la termoclina, la suavización de su pendiente (efecto contrario al del viento y la lluvia) (Lewis 1973) y la liberación de nutrientes.

Adicionalmente, es probable que la propia estabilidad de la columna de agua debido a la termoclina bien desarrollada durante la estratificación bien establecida (Fig. 14,15) ayuden a mantener suspendidas a las células de tamaño $> 2\mu\text{m}$ en la termoclina, zona que suele encontrarse dentro de la Z_{EU} (Fig. 9).

Es importante mencionar que Reynolds (1984) considera que la desventaja de una alta tasa de hundimiento puede estar aminorada por una tasa acelerada de asimilación de nutrientes y un alta tasa de reproducción (que contrarreste la alta tasa de sedimentación), hecho que se acentúa en aguas con altas temperaturas. Esto hecho podría explicar el porque células que tienden a sedimentarse, como son las diatomeas, pueden permanecer en un medio estratificado. Es probable que una combinación de diversos agentes de suspensión y aportación de nutrientes estén participando en mantener a las tallas $> 2\mu\text{m}$ en el epi- y metalimnion durante la estratificación bien establecida.

Durante la estratificación tardía, la dominancia casi generalizada de la talla $> 2\mu\text{m}$ puede explicarse de la siguiente forma. En primer lugar, durante este periodo se encontró una alta estabilidad en la columna de agua, de hecho presentó la máxima estabilidad en algunos años (1999 y 2001) (Fig. 14), lo cual podría estar favoreciendo la suspensión de las células grandes en el metalimnion. Por otra parte, durante este periodo se encontraron los vientos más fuertes (junto con los del periodo de circulación) del año, con valores de hasta 6 m/s (25.2 km/h). Esta velocidad del viento fue suficiente para mezclar el lago Lanao (Filipinas), a pesar de tener una profundidad de 120 m , el doble que el Lago Alchichica (Lewis, 1973). Con esto en mente, es posible que el viento esté generando suficiente turbulencia y mezcla y con ello ser responsable de los aumentos en la cantidad de

clorofila "a" registrados durante la estratificación tardía (de un promedio de 2.2 ± 0.45 a 2.8 ± 1.59 $\mu\text{g/L}$) y de la dominancia de la talla $> 2\mu\text{m}$. Finalmente, al acercarse el final de este periodo y el inicio de la circulación, existen liberaciones de nutrientes que de igual forma pueden favorecer a la dominancia de esta talla.

En las Tablas 26 y 27 se muestran, a manera de resumen, las características ambientales y atmosféricas que se presentan en el Lago Alchichica y que favorecen a una de las dos tallas de fitoplancton presentes. Al parecer, la talla $> 2\mu\text{m}$ puede dominar bajo el rango de condiciones de luz y temperatura que se presentan en el lago; sin embargo, sólo domina en condiciones de alta estabilidad (diferencia importante de densidad en la termoclina, por ejemplo, DCM en la estratificación bien establecida) o bajo condiciones de elevada turbulencia (periodo de circulación), así como en condiciones de concentraciones elevadas de nutrientes en el metalimnion, como en el primer caso o bien por la circulación general del lago, en el segundo caso. Es muy probable que por lo anterior, la talla grande haya podido dominar durante las estratificaciones tempranas que mantuvieron estas condiciones (i.e. 2000 y 2002).

Con base en lo anterior, se aceptan la cuarta hipótesis (*La clorofila total, así como la de la fracción de talla grande, se verán favorecida por ambientes con un alto grado de "suspensión", ya sea por mezcla turbulenta, o una zona de picnoclina y/o variaciones frecuentes de la Z_{MIX} ("atelomixis"). Las condiciones opuestas –bajo grado de "suspensión"– favorecerán la dominancia de la talla pequeña*) y quinta hipótesis (*La talla grande se verá favorecida por ambientes con relativamente alta disponibilidad de nutrientes; lo contrario favorecerá a la dominancia de la talla pequeña*). Lo anterior indica que son estos dos factores, la suspensión en la columna de agua y los nutrientes, los que parecen tener mayor influencia para explicar no solo la concentración de biomasa fitoplanctónica sino la dominancia de tallas en el lago Alchichica.

Finalmente, es interesante la correlación visual que se puede encontrar entre los aumentos en la concentración de NH_4 en el epi- y metalimnion con los aumentos en la contribución de la talla grande del fitoplancton en esas mismas capas (Fig. 56 y 57). La correlación de este nutrimento fue significativa con la clorofila "a" total y con ambas tallas.

Esto, aunque fuera del campo del presente estudio, pudiera ser un indicador de una relación importante entre el cambio de tallas en el lago Alchichica y la disponibilidad de este nutrimento. Su explicación y real intervención en el cambio de tallas deberá estudiarse en futuras investigaciones.

Finalmente, hay que hacer hincapié en que cada especie de fitoplancton tiene respuestas particulares a diferentes condiciones ambientales, y que es posible que la propia fisiología de las especies presentes en el Lago Alchichica (ver Anexo 1) les permita habitar en condiciones específicas presentes en un periodo o estrato del lago en específico. También, no se desconoce la influencia que otras variables biológicas (e.g. herbivoría) pueden tener sobre la biomasa fitoplanctónica, sin embargo, este trabajo no pretende explicar tales características sino más bien hacer un modelo general de los factores físicos, químicos y

meteorológicos que pudieran estar afectando los periodos de cambio del fitoplancton total y fraccionado. Investigaciones a futuro más específicas sobre las interacciones de cada especie de fitoplancton con otras condiciones físico-químicas particulares y con otros organismos (e.g. zooplancton) ayudarán a tener un entendimiento más profundo de los periodos de variación de la biomasa fitoplanctónica total y fraccionada en el lago Alchichica.

IX CONCLUSIONES

1. Durante el periodo 1998-2002 los periodos más importantes de variación de la clorofila "a" total en el lago Alchichica fueron el anual y el bianual. El primero de los periodos está relacionado con la hidrodinámica (monomixis cálida) del lago y el forzamiento estacional externo dominante. En el segundo caso, se debe a la alternancia de años "Tipo 1" y "Tipo 2". Los años "Tipo 1" muestran un periodo de circulación con altos valores de biomasa fitoplanctónica y concentraciones de OD y nutrientes distribuidos de forma homogénea en la columna de agua, picos hipolimnéticos de fitoplancton sedimentado durante la estratificación temprana junto con el transporte de Si hacia el fondo, anoxia temprana en el hipolimnion, liberación de NH_4 durante la estratificación tardía y un déficit de oxígeno importante en el hipolimnion. Los años "Tipo 2" se caracterizan por una circulación con valores más bajos de biomasa fitoplanctónica y OD, distribuidos de forma heterogénea en la columna de agua en forma similar a los nutrientes, estratificación temprana con valores mínimos de clorofila "a" y un déficit de oxígeno menor que el año anterior el cual es compensado la siguiente circulación dando lugar al año "Tipo 1". Esta alternancia de años está relacionada con un forzamiento externo –temperatura más fría durante la circulación- y un factor de control interno –la producción del año anterior-. El forzamiento externo probablemente sea causado por años "Niña".

2. Los periodos de variación de la fracción de clorofila "a" $> 2\mu\text{m}$ en el lago Alchichica son similares a aquellos de la clorofila "a" total debido a que esta talla es dominante la mayor parte del año.

3. La variación de la fracción de clorofila "a" $< 2\mu\text{m}$ en el lago Alchichica no presentó variaciones interanuales, sin embargo si se presentaron variaciones significativas por periodos (circulación, estratificación temprana, bien establecida y tardía), así como amplias desviaciones estándar en las concentraciones medias.

4. La clorofila total así como la de la fracción de talla grande en el lago Alchichica se ven favorecidas por ambientes con un alto grado de "suspensión" ya sea por la mezcla turbulenta durante la circulación y finales de la estratificación tardía o bien por la presencia de la picnoclina durante la estratificación bien establecida.

5. La talla grande en el lago Alchichica se favorece por ambientes con una relativamente alta disponibilidad de nutrientes. Los altos valores de contribución en porcentaje de la talla grande a la biomasa fitoplanctónica total se relacionan con altos valores de clorofila "a" total. Existe una relación entre el aumento de las concentraciones de NH_4 y el aumento en el porcentaje de contribución de la talla grande.

6. Durante cinco ciclos anuales en el lago Alchichica, la dominancia de las fracciones de fitoplancton se alternan de forma similar a la biomasa fitoplanctónica; en los años "Tipo 1" la talla grande domina todo el año con una tendencia a disminuir su porcentaje de contribución conforme avanza el año, alternando, en los años "Tipo 2", en los que la talla pequeña ($< 2\mu\text{m}$) domina durante periodos dentro de la estratificación temprana y el resto del año se revierte

esta dominancia hacia la talla grande ($> 2\mu\text{m}$) la cual tiende a aumentar su porcentaje de contribución hacia el final del año.

7. Las variables ambientales que favorecen condiciones de “suspensión” y una relativa alta concentración de nutrientes son las que explican en mayor grado, las variaciones en la concentración de la biomasa fitoplanctónica en el Lago Alchichica.

X REFERENCIAS

Adame, M.F., 2004. Fracciones de talla de fitoplancton en un ecosistema limnético tropical en el lago Alchichica, Puebla. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Agawin, N.S.R, C. Duarte y S. Agusti, 1999. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol. Oceanogr.* 45(3): 591-600.

Alcocer, J. y W.D. Williams, 1993. Lagos Salinos Mexicanos. Biodiversidad Marina y Costera de México. S.I., Salazar-Vallejo y N. E. González (eds.) Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 865 p.

Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M.R. Sánchez y G. Vilaclara, 2001. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 5: 3166-3169.

Alcocer, J. y A. Lugo, .2003. Effects of EL Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central Mexico. *Geofísica Internacional.*42 (3): 523-528.

Arredondo J.L, R. Castillo y M.A. Valladolid-Laredo, 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica.* 8:37-47

Arredondo, J.L., O. Vera y A.O. Ortiz, 1984. Análisis de componentes principales y cúmulos de datos limnológicos, en el lago de Alchichica, Puebla. *Biótica.* 9:23-39.

Barnes y Mann, 1991. *Fundamentals of Aquatic Systems.* Blackwell Scientific Publications. Oxford. 347 p.

Beaty, M.H. y B.C. Parker, 1995. Relative importance of pico-, nano-, and micro-plankton algae in Mountain Lake, Virginia. *J. Phycol.* 31(3).

Berman, T., L. Stone, Y.Z. Yacobi, B. Kaplan, M. Schlichter, A. Nishri y U. Pollinger, 1995. Primary production and phytoplankton in Lake Kinneret: A long-term record (1972-1993). *Limnol. Oceanogr.* 40(6):1064-1076.

Brandon, R.A., E. J. Maruska y W.T. Rumph, 1981. A new species of neotenic *Ambystima* (Amphibia, Caudata) endemic to Laguna Alchichica, Puebla, Mexico. *Bull. S. Acad. Sci.* 80(3): 112-125.

Bruno, S.F, R.D. Staker, G.M Sharma y J.T.Turner, 1983. Primary productivity and phytoplankton size fraction dominance in a temperate North Atlantic estuary. *Estuaries.* 6(3): 200-211.

Buen, F., 1945. Investigaciones sobre ictiología mexicana. I. Atherinidae de aguas continentales de México. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma México.* 16: 475-532.

Chisholm, S.W., P.G Falkowski and J.J. Cullen, 2001. Dis-Crediting Ocean Fertilization. *Science.* 294: 309-310.

Cole, G.A., 1983. *Textbook of Limnology.* Tercera edición. Editorial The CV Mosby Company, Missouri, EU. 401 p.

Cullen, J.J., 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll *a*. *Can. J. Fish. Aquatic Sci.* 39:791-803.

De Emiliani, M. Y M. Shiaffino, 1974. Phytoplankton in Lake Mascaridi (Río Negro, Argentina). *Bol. Sci. Argent. Bot.* 15 (4): 411-426.

Filonov, A., y J. Alcocer, 2002. Internal waves in a tropical crater lake: Alchichica, Central Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28: 1857-1860.

Frenette, J. Jr., 1993. Impact of hydrodynamic factors on photosynthesis and the fate of primary production in an oligotrophic lake. University of Laval, Canada. 177pp.

Frenette, J., L. Legendre, J.L. Dodson, S. Demers y M. Boule, 1994. Mixing, stratification and the fate of primary production in an oligotrophic multibasin lake system (Québec, Canada). *J. Plankton Res.* 16(9): 1095-1115.

Frenette, J., L. Legendre, S. Demers y M. Boule, 1996. Size-related photosynthetic characteristics of phytoplankton during periods of seasonal mixing and stratification in an oligotrophic multibasin lake system. *J. Plankton Res.* 18(1):45-61.

Frenette, J., V. Warwick, L. Legendre y T. Nagata, 1996b. Size-dependent phytoplankton responses to atmospheric forcing in Lake Biwa. *J. Plankton Res.* 18(3): 371-391.

Gaedke, U., 1993. Ecosystem analysis based on biomass size distributions: A case study of a plankton community in a large lake. *Limnol. Oceanogr.* 38(1):112-127.

Gervais, F., J. Padisák y R. Koschel, 1997. Do light quality and low nutrient concentration favour picocyanobacteria below the thermocline of the oligotrophic lake Stechlin?. *J. Plankton Res.* 19(6):771-781.

Guerrero, F. y M.C., Castro, 1997. Chlorophyll *a* of size-fractionated phytoplankton at a temporary hypersaline lake. *Int. J. of Salt Lake Res.* 5:253-260.

Hambright, K.D., M. Gophen y S. Serruya, 1994. Influence of long-term climatic changes on the stratification of a subtropical, warm monomictic lake. *Limnol. Oceanogr.* 39(5):1233-1242.

Hawkins, P.R. y D.J. Griffiths, 1993. Artificial destratification of a small tropical reservoir: effects upon the phytoplankton. *Hydrobiologia.* 254:169-181.

Hecky, R. E. y H.J. Kling, 1981. The phytoplankton and protozooplankton of the euphotic zone of Lake Tanganyika: species composition, biomass, chlorophyll content and spatio-temporal distribution. *Limnol. Oceanogr.* 26 (3): 548-564.

Horne, A.J y Goldman, Ch. R, 1994. *Limnology*. Segunda edición. Editorial Mc Graw Hill, 576 p.

Huszar, V.L.M, L.H.S Silva, P. Domingos, M. Marinho y S. Melo, 1998. Phytoplankton species composition is more sensitive than OECD criteria to the trophic status of three Brazilian tropical lakes. *Hydrobiologia.* (369/370): 59-71.

Iriarte, J. L, G. Pizarro, V.A. Troncoso, M. Sobarzo, 2000. Primary production and biomass of size-fractionated phytoplankton off Antofagasta, Chile (23-24°S) during pre-El Niño and El Niño 1997. *J. of Marine Systems.* 26:37-51.

Jassby, A.D., R. C. Goldman, T.M. Powell. 1992. Trend, seasonality, cycle, and irregular fluctuations in primary productivity at Lake Tahoe, California-Nevada, USA. *Hydrobiologia*. 246:195-203.

Kalff J. y Watson, 1986. Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: a tropical and temperate zone comparison. *Hydrobiologia*. 138: 161-176.

Kim W-S y M. Chang, 1992. Zooplankton grazing during an euglenoid bloom in Reeves Bay, Nueva York. *Ocean Res.* 14:25-34.

Lafond, M., B. Pinel-Alloul y P. Ross, 1990. Biomass and photosynthesis of size-fractionated phytoplankton in Canadian Shield lakes. *Hydrobiologia* 196:25-38.

Lalli y Parsons, 1993. *Biological Oceanography: an Introduction*. Pergamon Press. Oxford, UK. 301 pp.

Legendre P. y L. Legendre, 1998. *Numerical Ecology. Developments in Environmental Modelling 20*. Elsevier. Amsterdam.

Legendre, L., 1999. Environmental fate of biogenic carbon in lakes. *Jap. J. Limnol.* 60(1): 1-10.

Lewis, W.M., Jr, 1973. The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnol. Oceanogr.* 18(2): 200-217

Lewis, W.M., Jr., 1978. A compositional, phytogeographical and elementary structural analysis of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philipines. *J. Ecol.* 66: 213-226

Lewis, W.M., Jr., 1986. Phytoplankton Sucesion in Lake Valencia, Venezuela.-*Hydrobiologia*. 138: 189-203

Lewis, W.M., Jr., 1996. Tropical Lakes: how latitude makes a difference. pp 43-64. F. Shiemer & K.T. Boland (eds.) *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing, Amsterdam, Holanda.

Lluch-Belda, D., D.B. Lluch-Cota, S.E. Lluch-Cota, 2003. Scales of interannual variability in the California Current System: associated physical mechanisms and likely ecological impacts. *CalCOFI. Rep.* Vol. 44.

Lugo, A., 1993. Estudio de las comunidades litorales de protozoarios en seis lagos cráter del estado de Puebla, mediante el método de colonización de sustratos artificiales. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Lugo A., E. González, M. Sánchez y J. Alcocer, 1999. Distribution of *Leptodiptomus novamexianus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Rev. Biología Tropical* (suplemento 1):141-148.

Lugo A., J. Alcocer, M.R. Sánchez, E. Escobar y M. Macek, 2001. Temporal and spatial variation of bacterioplankton abundance in a tropical, warm-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 5:2968-2971.

Malone, T.C. y M. B. Chervin, 1979. The productin and fate pf phytoplankton size fractions in the plume of the Hudson River, New York Bight. *Limnol. Oceanogr.* 24 (4):683-696.

- Margalef, R., 1983. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona, España. 1010 p.
- Melack J.M., 1976. Primary Productivity and Fish Yields in Tropical Lakes. *Transactions of the American Fisheries Society*. 105(5).
- Melack, J. M., 1996. Recent developments in tropical limnology. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26:211-217.
- Mistry, V.V. y D. Conway, 2003. Remote forcing of East African rainfall and relationships with fluctuations in levels of Lake Victoria. *Int. J. of Climatol.* 23(1):67-89.
- Oliva, M.G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta y M.R. Sánchez, 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia*. 466:299-306.
- Payne, A.I., 1986. *The ecology of tropical lakes and rivers*. Wiley. Chichester. 301 p.
- Pollinger, U. 1986. Phytoplankton periodicity in a subtropical lake (Lake Kinneret, Israel). *Hydrobiologia*. 138: 127-138.
- Ross, P.E. y M. Munawar, 1981: Preference for nanoplankton size fractions in Lake Ontario zooplankton grazing. *J. Great Lakes Res.* 7(1): 65-67 no.1.
- Reynolds, C.S., 1984. *The Ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Segunda Edición. Gran Bretaña. 384 p.
- Reynolds C. S. R., 1988. Functional morphology and the adaptive strategies of freshwater phytoplankton. En: Sandgren C. D. (Ed.) *Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. USA, Australia. 442 p.
- Sánchez, M., 2000. Variación de la clorofila "a" fitoplanctónica y sus mecanismos de control en un lago atalasalino tropical. Tesis de Maestría. ICMYL. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Sánchez, R., 2005. Dinámica vertical y temporal de los nutrientes (N, P, Si) en un lago monomóctico cálido tropical, Alchichica, Puebla, México. Tesis de Maestría. ICMYL. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Salmaso, N., 2005. Effects of climatic fluctuations and vertical mixing on the interannual trophic variability of Lake Garda, Italy. *Limnol. Oceanogr.* 50(2): 553-565.
- Sarvala, J., K. Salonen, M. Jaervinen, E. Aro, T. Huttula, P. Kotilainen, H. Kurki, V. Langenberg, P. Mannini, A. Peltonen, P.D. Plisnier, I. Vuorinene, H. Moelsae y O.V. Lindqvist, 1999. Trophic structure of Lake Tanganyika: carbon flows in the pelagic food web. *Hydrobiologia* 407: 149-173.
- Sommer, U., Z. M. Gliwicz, W. Lampert y A. Duncan, 1986. The PEG –model of seasonal successions of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.* 104 (4): 422-471.
- Stockner, J.G., 1998. Phototrophic picoplankton: An overview from marine and freshwater ecosystems. *Limnol. Oceanogr.* 33(4, parte 2):765-775.
- Suttle, C.A. y P.J. Harris. Ammonium and phosphate uptake kinetics of size-fractionated plankton from an oligotrophic freshwater lake. *J. Plankton Res.* 10(1):133-149.
- Stronge, K.M., R.V. Smith y D. Lennox, 1998. Predicting the spring algal biomass in Lough Neagh using time series analysis. *Freshwat. Biol.* 39: 593-600.

- Talling, J.F., 1986. The seasonality of phytoplankton in African lakes. *Hydrobiologia*. 138: 139-160.
- Talling, J.F. y J. Lemoalle, 1998. *Ecological Dynamics of Tropical Inland Waters*. Cambridge. 441 p.
- Tamigneaux, E., L. Legedre, B. Klein y M. Mingelbier, 1999. Seasonal dynamics and potential fate of size-fractionated phytoplankton in a temperate nearshore environment (Western Gulf of St. Lawrence, Canada). *Est. Coast. Shelf Sci.* 48: 253-269.
- Tereshchenko, I., A. Filonov, C. Monzón, 2001. Descripción de métodos estadísticos aplicados a la hidrometeorología. Editorial Pandora. Universidad de Guadalajara. México. 123 p.
- Gallegos, C. Monzón y R. Rodríguez, 2002. J. El Niño 1997-98 and the hydrometeorological variability of Chapala, a shallow tropical lake in Mexico. *Hydrology*. 264(1-4):133-146.
- Tremblay, J-É, L. Legendre y J-C. Therriault, 1997. Size-differential effects of vertical stability on the biomass and production of phytoplankton in a large estuarine system. *Est. Coast. Shelf Sci.* 45 (4):415-431
- Waite, M. A. y A. P. Thompson, 1992. Does energy control the sinking rates of marine diatoms?. *Limnol. Oceanogr.* 37(3): 468-477.
- Warwick F. V., 1983. Phytoplankton production and winter mixing contrasting effects in two oligotrophic lakes. *J. Ecol.* 71:1-20.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology; Lake and River Ecosystems*. Tercera edición. Editorial Academic Press, EUA. 1006 p.
- Wood, R. B., R.M. Baxter and M. V. Prosser, 1984. Seasonal and comparative aspects of chemical stratification in some tropical crater lakes, Ethiopia. *Freshwater Biol.* 14:551-573.
- Zafar, 1986. Seasonality of phytoplankton in some South Indian lakes. *Hydrobiologia*. 138:177-187.
- Zhao, W.S., H. Xing, L. An. The contribution of algal picoplankton to the phytoplankton biomasses and primary production in freshwater bodies in Dalian. *J. of Dalian Fisheries College/Dalian Shuichan Xueyuan Xuebao Dalian*. 16(3):159-162.

XI AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT y a la DGAPA por las becas otorgadas para llevar a cabo mis estudios de Maestría en Ciencias del Mar y Limnología.

A los proyectos CONACYT 34893 y 41667 a través de los cuales se generaron los datos analizados en la presente investigación.

Al Proyecto de Investigación en Limnología Tropical (PILT) de la FES Iztacala por permitirme el uso de sus instalaciones para realizar el análisis de las muestras y al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, por todo su apoyo en el uso de sus instalaciones.

A mi director de tesis; Dr. Javier Alcocer por su apoyo, comprensión, muchas risas y su gran amistad de más de tres años.

A los miembros del comité tutorial; Dra. Elizabeth Ortega, Dr. Javier Carmona por su comprensión y sus comentarios a este trabajo de investigación.

A los miembros del jurado: Dr. Martín Merino por su paciencia y ayuda en sustentar todas mis ideas creativas y no creativas y a la Dra. Elva Escobar por su siempre disposición a ayudarme y su gran ejemplo como investigadora, y más que nada por ser una gran amiga en todo este tiempo de conocernos.

Al Dr. David Salas por su apoyo incondicional para realizar los estadísticos requeridos para los análisis de series de tiempo utilizados en este trabajo. Al Dr. Anatoliy Filonov por su ayuda en la interpretación de los análisis de series de tiempo y por las risas en el B/O Justo Sierra. Al M. en C. David Ávalos por su apoyo para la realización de los análisis de series de tiempo complementarios.

A Laura Peralta y Luis A. Oseguera por el apoyo logístico de campo para la obtención de las muestras analizadas y junto con Benigno Badillo por el apoyo en los análisis de laboratorio.

A todos mis compañeros del ICMYL, en especial a Jorge Castañeda por su apoyo cibernético.

A mi querida familia. A mi papá por ser mi firme apoyo, mi colega investigador y uno de mis más grandes ejemplos a seguir. A mi mamá por ser siempre y ante todo mi mejor amiga y una gran mujer. A mis hermanos; Ma. José, Jordi y Diego, por compartir su vida conmigo y hacer más feliz la mía.

A Esteban, por todo y mucho más, por que las palabras no alcanzan.

A mis queridos amigos: Jes, Vale, Ibas, Quique. Por que no importa el tiempo y la distancia siempre estaremos juntos realizando nuestros sueños.

A todos mis amigos biólogos, por que entregan su mente, su corazón y su vida para cuidar a esta Tierra. A: Vane, Eduardo, Olmo, Kim, Ernesto, Clarita y Suzette.

A mis amigos del posgrado; Elsa, Jorge, Benjamín y Santiago por hacerme más felices mis días en la maestría.

A mis compañeros de laboratorio; Yvette, Myrna, León, Balam, Erica, Adriana, Citlali, Ramón, Lalo, Diana, Daniela, Luciana y Javier. Por su ayuda y por su compañía durante este último año.

Por ayudarme a hacer mis sueños realidad, a todos y todas, infinitas gracias!!!!

ANEXO I

Fitoplancton (*Oliva *et al.* 2001)

Lista especies Alchichica

*Cyclotella choctawhatcheena**
*Cyclotella quillensis**
*Nodularia spumigena**
*Monoraphidium minutum**
*Synechocystis aquatilis**
*Oocystis parva**
*Oocystis submarina**
Chaetoceros elmorei. *
Microcystis sp.
Glenodinium sp.
Cymbella sp.
Aulacoseira
Fragilaria sp.
Achanthes sp.
Nitzschia sp.
Rhopalodia sp.
Chroococcus
Cocconeis
Euglena sp.
Glenodinium sp
Cryptomonas sp.
Cyanodictium sp.
Syneccoccus sp.
Synechocystis sp.

Circulación

Cyclotella choctawhatcheena
Microcystis sp.
Monoraphidium minutum
Oocystis parva
Synechocystis aquatilis
Chroococcus
Glenodinium sp

Estratificación temprana

Marzo:

Monoraphidium minutum
Aulacoseira
Fragilaria sp.

Cocconeis
Rhopalodia sp.

Abril:

Oocystis submarina
Nodularia spumigena

Mayo:

Nodularia spumigena
Oocystis submarina
Oocystis parva
Monoraphidium minutum
Microcystis sp.
Synechocystis aquatilis
Cyclotella choctawhatcheena
Euglena sp.
Glenodinium sp
Cryptomonas sp.

Estratificación bien establecida y tardía

Cyclotella choctawhatcheena
Oocystis parva
Monoraphidium minutum
Synechocystis aquatilis
Cymbella sp.
Achanthes sp.
Nitzchia sp
Chaetoceros elmorei.
Chroococcus
Glenodinium sp.

ANEXO 2

Algoritmo Transformada Rápida de Fourier.

(Tomado de Tereshchenko, Filonov y Monzón, 2001; cap. 3. p. 107)

La transformada compleja de Fourier de una serie nos da el espectro complejo aleatorio. La potencia de cada componente espectral de este proceso también se presenta aleatoria. Sin embargo, si obtenemos las funciones espectrales promediadas por un conjunto de series infinitas de un proceso aleatorio cuando $T \rightarrow \infty$, entonces la potencia será una función de frecuencia no aleatoria $S(\omega)$ y lleva el nombre de *densidad espectral* o *espectro del proceso aleatorio estacionario*. El espectro definido de esta manera está relacionado con la función de correlación del proceso en estudio por la expresión:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

ANEXO 2

Algoritmo Transformada Rápida de Fourier.

(Tomado de Tereshchenko, Filonov y Monzón, 2001; cap. 3. p. 107)

La transformada compleja de Fourier de una serie nos da el espectro complejo aleatorio. La potencia de cada componente espectral de este proceso también se presenta aleatoria. Sin embargo, si obtenemos las funciones espectrales promediadas por un conjunto de series infinitas de un proceso aleatorio cuando $T \rightarrow \infty$, entonces la potencia será una función de frecuencia no aleatoria $S(\omega)$ y lleva el nombre de *densidad espectral* o *espectro del proceso aleatorio estacionario*. El espectro definido de esta manera está relacionado con la función de correlación del proceso en estudio por la expresión:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$